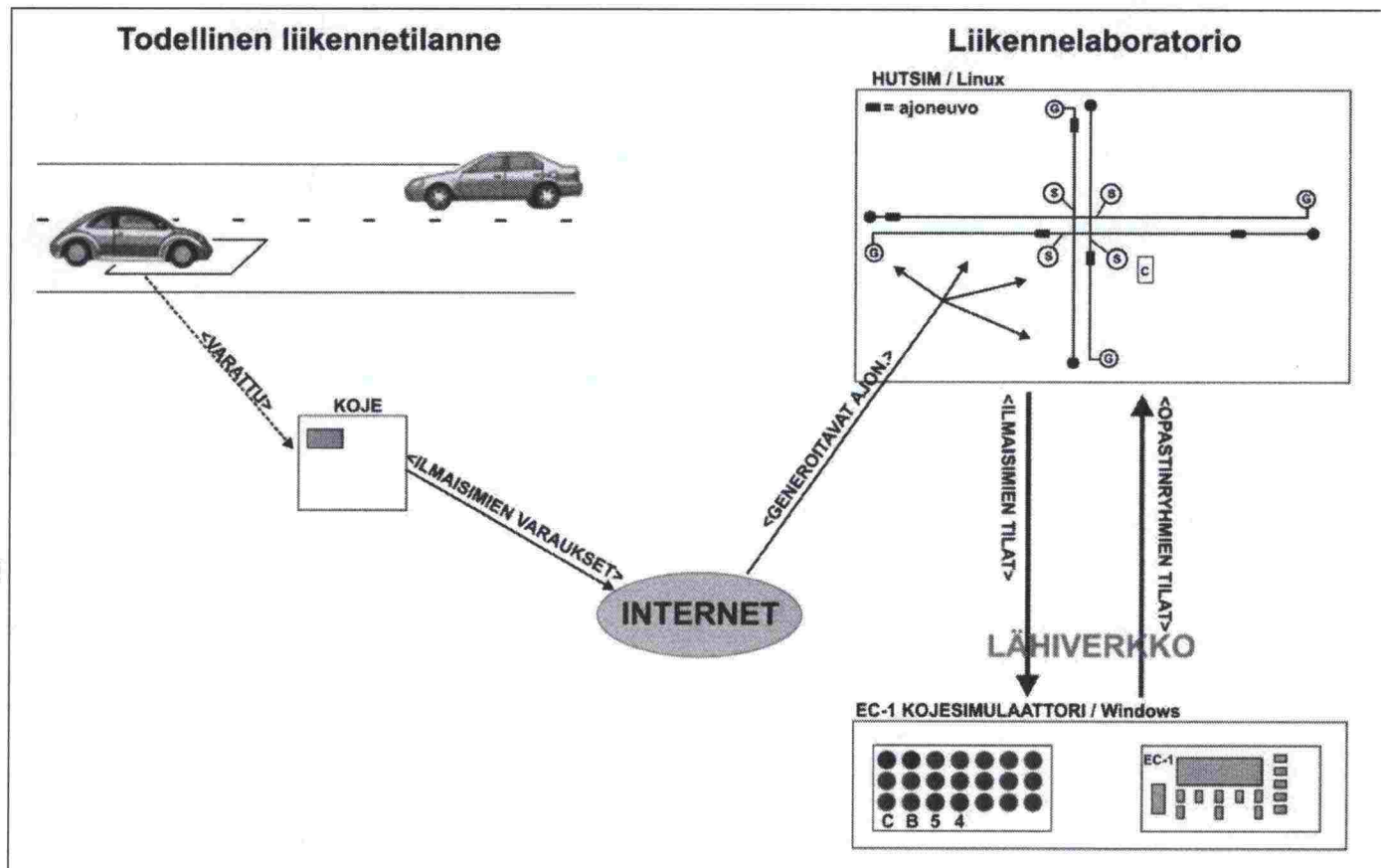


Valo-ohjauksisten liittymien simulointi Tuusulanväylällä ajantasaisella liikennetiedolla

Tiehallinnon selvityksiä 51/ 2004



Reetta Jokinen

**Valo-ohjauksisten liittymien simulointi Tuusulanväylällä
ajantasaisella liikennetiedolla**

Tiehallinnon selvityksiä 51/2004

Tiehallinto

Helsinki 2004

Kannen kuva: Reetta Jokinen

Helsinki 2004 Verkkójulkaisu pdf (www.tiehallinto.fi/julkaisut)

ISSN 951-803-371-4

ISBN 1459-1553

TIEH 3200901-v

Tiehallinto

UUDENMAAN TIEPIIRI

Liikenteen palvelut

Opastinsilta 12 A

PL 70

00521 HELSINKI

Puhelinvaihde 0204 2211

Reetta Jokinen: Valo-ohjauksisten liittymien simulointi Tuusulanväylällä ajantasaisella liikennetiedolla. Helsinki 2004. Tiehallinto, Uudenmaan tiepiiri. Tiehallinnon selvityksiä 51/2004. 142 s. + liitt. 16 s. ISSN 951-803-371-4, ISBN 1459-1553, TIEH 3200901-v.

Asiasanat: <http://tienet.tieh.fi/kirjasto/asiasana.htm>

25; 21

Aiheluokka: http://172.17.11.25/sinetti/tiehallinto/yhteiset_palvelut/kirjasto/listat/luokitus.txt

TIIVISTELMÄ

Simuloinnin avulla voidaan mallintaa satunnaisvaihtelua sisältäviä järjestelmiä, sillä osa tiedoista generoidaan malliin todennäköisyysjakaumien perusteella. Luotettavan simulointimallin avulla voidaan tehdä muun muassa eri liikennejärjestelmien vaikutustarkasteluja ja hyödyntää tuloksia liikennesuunnittelussa. Stokastisten mallien simulointi aiheuttaa malliin kuitenkin epätarkkuutta.

Mallin luotettavuutta voidaan parantaa syöttämällä simulointiohjelmistoon tietoverkon avulla todenmukaista liikennetietoa, jonka mukaan ohjelmisto toteuttaa mallin liikennetilanteen. Näiden osajärjestelmien muodostamaa kokonaisuutta kutsutaan integroiduksi simulointijärjestelmäksi. HUTSIM-mikrosimulointiohjelmistoon yhdistettiin EC-1 kojesimulaattoriohjelmisto ja ajantasainen liikennetietojärjestelmä. Osajärjestelmien lähettämien tietojen perusteella HUTSIM toteutti simulointimallin valo-ohjauksen kuten oikea koje ja generoi ajoneuvo-oliot malliin todellisen liikennetilanteen mukaisesti.

Integroidun simulointijärjestelmän toteutus onnistui ja järjestelmä toimi asetettujen tavoitteiden mukaisesti. Kehitetyn simulointijärjestelmän toiminnallisuus testattiin tapaustutkimuksella. Samalla tarkastettiin järjestelmän toimintavarmuus ja simulointimallin todenmukaisuus. Simulointijärjestelmän toimintavarmuutta erityisesti EC-1 kojesimulaattorin osalta on parannettava. Muut testitulokset olivat myönteisiä ja järjestelmän simulointituloksia voidaan pitää luotettavina.

Tapaustutkimus toteutettiin Tuusulassa Tuusulanväylän kolmen valo-ohjauksisen liittymän osalta. Pilotissa kehitettiin liittymien valo-ohjausta lisäämällä alueen eteläisin liittymän yhteenkytkettyihin liikennevaloihin. Simulointimallin animaation avulla voitiin analysoida alueen nykyisen ja uuden valo-ohjelman vaikutuksia liikennetilanteeseen. Tarkempi sujuvuustarkastelu tehtiin simuloinnin viivytystulosten perusteella. Suunniteltu yhteenkytkentä siirsi viivytysten kannalta ongelmakohdan keskimmäisestä liittymästä eteläsimpään liittymään, joten muutokset eivät merkittävästi parantaneet alueen sujuvuutta.

Tutkimuksessa luotiin hyvä pohja ajantasaisen liikennetiedon hyödyntämiselle liikennesuunnittelussa. Simulointijärjestelmän avoimen rajapinnan avulla

ohjelmistoon voidaan lisätä uusia menetelmiä, jotka mallintavat liikennetilannetta yhä todenmukaisemmin. Jatkossa oli hyvä panostaa enemmän järjestelmän tuotteistamiseen esimerkiksi parantamalla simulointijärjestelmän luotettavuutta ja käyttöjärjestelmää.

SUMMARY

It is now widely recognized that traffic simulation is an effective method to model traffic. The objective of this study was to create more realistic simulation model so that the results of the simulation would be even more reliable. Simulation can model stochastic systems such as traffic, of using probability distribution to generate objects and events. Stochastic variation is, however, a source of inaccuracy.

The validity of traffic simulation model can be improved by connecting on-line or other specific subsystems to the simulation software. These subsystems produce more accurate input data improving the validity of the model. This configuration of inter connected subsystems is called an integrated simulation system. The focus of the research was the connection of traffic simulation with actual signal control systems and with real-time traffic input from field measurements. All these subsystems have interfaces, where digital messages are transmitted. The controller simulator produces the states of signal group objects in the traffic simulator. The online traffic data is received by the traffic simulator which generates vehicle objects according to the real-time information.

The implementation of the integrated simulation system succeeded and the system provided a realistic and practical model. The functionality of the system was tested by case study, which was also used to analyze the reliability of the system and validity of the model. There are some software level reliability issues with EC-1 simulator. Otherwise test results indicated that the model is valid and the simulation results are realistic.

In the case study the traffic signal of the test area were improved by adding a coordination feature also to the southeast junction. The new signal plans were compared with the current control by modeling the area using the integrated simulation system. The added coordination did not improve the fluency of traffic.

There are many options for future studies and developments with the integrated simulation system. The open interface enables the integration of subsystems connected to the real world. In the future the reliability of the system should be better since it influences the usability of the software.

ESIPUHE

Tutkimuksessa perustellaan ajantasaisen ja yksityiskohtaisen liikennetiedon tärkeyttä liikennesuunnittelussa. Työssä sovellettiin olemassa olevaa tekniikkaa uudella tavalla ja siten pyrittiin vastaamaan nykyliikenteen haasteisiin todenmukaisella liikenteen mallintamisella. Työn aikana toteutettiin integroitu simulointijärjestelmä, jossa liikenneverkkomalliin syötettyjen ajoneuvojen määrä saadaan lähes ajantasaisesti mallinnettavalta alueelta ja todenmukainen valo-ohjaus EC-1 kokesimulaattorilta. Toteutuksessa on yhdistetty nerokkaita ratkaisuja, joiden avulla liikenteen simulointi on tavallista mallinnusta todenmukaisempaa ja tulokset luotettavia. Työ sisältää yksityiskohtaisen kuvauksen kehitetyn simulointijärjestelmän teknisestä ja toiminnallisesta arkkitehtuurista sekä selvityksen Tuusulan pilotista. Liikenteen mikrosimuloinnin nykytilanne on kartoitettu kirjallisuusselvityksen avulla.

Tutkimus on tehty Teknillisen korkeakoulun liikennelaboratoriossa Uudenmaan tiepiirin Liikenteen hallinta -yksikön toimeksiannosta. Työ on samalla Reetta Jokisen diplomityö, jonka valvojana toimi liikennetekniikan professori Tapio Luttinen ja ohjaajana TkT Iisakki Kosonen. Tutkimuksen aikana perustettiin työryhmä, johon kuuluivat yllä mainittujen lisäksi Liikennekeskuksen Helsingin toimipisteen päällikkö Mauri Pyykönen ja Uudenmaan tiepiirin liikennetutkija Tuuli Ryhänen sekä Peek Trafficin toimitusjohtaja Seppo Härmäläinen ja ohjelmistonsinööri Michael Rychlic. Keväällä 2004 Peek Trafficin Pohjoismaiden osastot myytiin Swarco Oy:lle, jolloin yhteistyökumppaniksi vaihtui Swarco Oy.

Helsingissä joulukuussa 2004

Tiehallinto
Uudenmaan tiepiiri
Liikenteen palvelut

Sisältö

1. JOHDANTO	11
1.1. Työn taustat	11
1.2. Tavoitteet	13
1.3. Tutkimuksen rajaus	14
1.4. Käsitteistö	15
2. LIIKENTEEN VALO-OHJAUSJÄRJESTELMÄ	19
2.1. Liikenteen ohjauksen tavoitteet	19
2.2. Valo-ohjauslaitteet	20
2.2.1. Opastimet	20
2.2.2. Ilmaisimet	21
2.2.3. Ohjauskoje	22
2.3. Valo-ohjauksen periaatteet	23
2.4. Opastinryhmäohjaus	26
2.4.1. Yleiskuvaus	26
2.4.2. Vaiheistus	27
2.4.3. Suoja-aika ja vaihtumisaika	30
2.4.4. Kiertoaika	32
2.4.5. Vihreän ajallinen kesto	33
2.4.6. Minimitoiminnot turvallisuuden parantamiseksi	35
2.4.7. Liikenneohjauksen sujuvuustoiminnot	37
2.5. Yhteenkytketty valo-ohjaus	40
2.6. EC-1 ohjauskojeen toiminta	43
3. LIIKENTEEN MIKROSIMULOINTI	46
3.1. Simuloinnin perusteet	46
3.2. Mikrosimulointi	48
3.2.1. Käyttötarkoitus ja toimintaperiaatteet	48
3.2.2. Syöttötiedot	54
3.2.3. Tulokset	57
3.3. Ajantasainen liikennesimulointi	58
4. DIGITAALISTEN JÄRJESTELMIEN KESKINÄINEN TIEDONVÄLITYS	61
4.1. Tiedonsiirron perusteet	61
4.2. Tietoverkon OSI-malli	61
4.3. Pakettikytkentäinen tietoverkko	64
4.4. HUTSIMin rajapinnat	69
4.4.1. Määrittely	69
4.4.2. HUTSIM ja SCOOT – ajantasainen simulointijärjestelmä	69
4.4.3. HUTSIM ja todellinen koje – HUTSIM-ohjelmiston prototyyppi	71
4.4.4. HUTSIM ja SPOT – alueellisen valo-ohjauksen simulointi	72

4.4.5. HUTCON – simulointiohjelmiston sisäinen valo-ohjaus	74
5. INTEGROIDUN SIMULOINTIJÄRJESTELMÄN TOTEUTUS	75
5.1. Järjestelmän yleiskuvaus	75
5.2. Tietoliikenneyhteyksien järjestäminen	77
5.3. Tiedonvälityksessä käytettävien viestien formaatit	81
5.3.1. Liikenne- ja kokesimulaattorin väliset viestit	81
5.3.2. Ajantasaiset liikennetietoviestit	83
5.4. HUTSIMin ja EC-1 kokesimulaattorin välisen tietoyhteyden toteutus	85
5.5. Ajantasaisen liikennetiedon käytön toteutus HUTSIM-ohjelmistossa	86
5.6. Integroidun simulointijärjestelmän testaus	88
5.7. Järjestelmän käyttö	94
6. TUUSULAN TESTIALUE	95
6.1. Testialueen kuvaus	95
6.1.1. Alueen sijainti ja liikennemäärät	95
6.1.2. Infrastruktuurin ja valo-ohjauksen kuvaus	96
6.1.3. Vanhan Tuusulantien liittymä	97
6.1.4. Itäisen Ohikulkutien liittymä	101
6.1.5. Haukantien liittymä	105
6.1.6. Itäisen Ohikulkutien ja Haukantien yhteenkytkentä	108
6.2. HUTSIM-malli	110
6.3. Alueen liikenteelliset ongelmat	113
6.3.1. Turvallisuus	113
6.3.2. Sujuvuus	116
6.4. Valo-ohjauksen parantaminen	118
6.4.1. Tavoitteet	118
6.4.2. Liittymien uudet valo-ohjelmat	120
6.4.3. Tulokset	123
7. YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT	127
7.1. Integroitu simulointijärjestelmä	127
7.1.1. Toteutuneet tavoitteet	127
7.1.2. Simulointijärjestelmän ominaisuudet	128
7.1.3. Jatkokehittämisen- ja tutkimuskohteet	130
7.2. Tuusulan testialueen valo-ohjaus	132
7.2.1. Uudet valo-ohjelmat	132
7.2.2. Valo-ohjelmien jatkokehittäminen	134

LÄHDELUETTELO

LIITTEET

JOHDANTO

1.1. Työn taustat

Liikennemäärien kasvu ja liikenteen kysynnän keskittyminen tiettyihin vuorokauden aikoihin ovat luoneet paineita liikenteen ohjauksen kehittämiseksi. Liikennejärjestelmien kapasiteettia voidaan lisätä muun muassa tarkoituksenmukaisella valo-ohjauksella, jossa opastimien antamien signaalien avulla erotetaan ajallisesti toisistaan tärkeimmät törmäysuhanalaiset liikennevirrat. Liikennetieto-ohjauksella voidaan mukauttaa valo-ohjauksen ajoitusta sen hetkisen kysynnän mukaan. Kun liikennevalot toteuttavat kysynnän mukaista ohjausta, liittymästä aiheutuva viivytys saadaan mahdollisimman vähäiseksi. Sujuvuuden lisäksi liikennetiedon hyödyntäminen valo-ohjauksessa parantaa liittymän turvallisuutta. Liikennetiedon avulla voidaan muun muassa määrittää valojen vaihtumisen turvallinen ajankohta. Kun opastimen kuva vaihtuu liikenteen kannalta sopivalla hetkellä, peräänajot ja ajoneuvojen ajaminen liittymään punaisen opastinkuvan aikana vähentyvät.

Ohjelmoitaessa liikennetieto-ohjattuja liikennevaloja käytetään useita ohjausparametreja, joiden vaikutusten arviointi analyttisin menetelmin ei ole käytännössä mahdollista. Liikenteen simulointi on noussut tärkeäksi suunnittelun apuvälineeksi. Mallinnuksessa on kuitenkin aina kyse todellisuuden yksinkertaistamisesta, mikä voi aiheuttaa tuloksiin epätarkkuutta. Todellisen liikennetilanteen simuloiminen tarvittavalla tarkkuudella mahdollistaa luotettavammat tulokset. Tarkoituksenmukaisesti käytettynä simulointi säästää liikenteen eri osapuolten rahaa ja aikaa.

Liikennesuunnittelussa tarvittavaa tietoa liikennetilanteesta on alun perin kerätty käsin laskemalla. Liikennejärjestelmissä lisääntyneet elektroniset laskentalaitteet kattavat suomalaista tiestöä koko ajan paremmin, tietoa saadaan digitaalisesti tietoverkon avulla. Liikennetieto-ohjaus saa tarvittavan liikennetiedon induktiosilmukoista, joita on alettu hyödyntää myös liikenteen seurannassa. Liikennettä laskevan silmukan on oltava kais-takohtainen, kun valo-ohjauksessa riittää suuntakohtainen silmukka. Tämä on osittain hidastanut silmukoiden avulla tapahtuvan liikenteen seurannan kehitystä laaja-alaisemmaksi. Toinen kehitystä hidastava tekijä on se, ettei tietoa jalosteta ja hyödynnetä automaattisesti.

Vaikka suomalaisessa kaupunkiympäristössä on kattavasti silmukoita, liikennetiedon hyödyntämisen kehitys on pysähtynyt tilastointiin. Digitaalisesti saapuvaa liikennetietoa ei käytetä automaattisesti suunnitteluohjelmistoissa. Tietoa jalostetaan käsin ja suunnittelija itse syöttää tarvittavat tiedot ohjelmistoon. Nykyisen tekniikan avulla tiedon jalos-

tus voidaan toteuttaa huomattavasti nopeammin, kun se tehdään automaattisesti digitaalimuodossa laitteistojen välisenä tiedonsiirtona.

Teknillisen korkeakoulun liikennelaboratoriossa kehitetyn mikrosimulointiohjelmiston, HUTSIMin, simuloima valo-ohjaus toteutettiin ensin oikean kojeen avulla (Kosonen 1996). Käytännössä kyseinen järjestelmä pystyi simuloimaan vain yhden liittymän liikennetilanteen. Järjestelmää jatkokehitettiin ruotsalaisen TFK liikennetutkimuslaitoksen kanssa. Kososen ja Davidsonin (1994) toteuttamassa kehityshankkeessa HUTSIMiin yhdistettiin SPOT-kojejärjestelmä, jossa kojeiden muodostama ryhmä toteutti alueellista valo-ohjausta. Perusidea oli edelleen sama eli todelliset kojeet tuottivat HUTSIMille opastintilat simuloidun liikennetilanteen perusteella.

Kun todellisten kojeiden ja simulointiohjelmiston väliset järjestelmät oli testattu toimiviksi ja kojeen tuottama valo-ohjaus voitiin mallintaa, simulointiohjelmistoon kehitettiin sisäinen ohjauskoje. Järjestelmän nimeksi annettiin HUTCON ja sen toimintaperiaatteet on esitetty tarkemmin Kososen (1999) väitöskirjassa. Sisäinen valo-ohjaus optimoi opastintiloja samoin periaattein kuin kojeet todellisissa liittymissä, mutta sen toiminnot ovat suppeammat. Todellisessa kojeessa on toteutettu enemmän parametreja kuin mitä HUTCONiin määritettiin, ja siten todellisessa ohjauksessa on useampia ohjelmavaihtoehtoja. Kuitenkin, sisäinen valo-ohjausjärjestelmä mahdollisti useamman liittymän simuloimisen ilman taloudellisesti kallista ja vaikeasti toteutettavaa kojejärjestelmää, mikä oli merkittävä edistys HUTSIM-simuloinnissa. HUTSIMin avulla toteutettavien valo-ohjausmallinnusten tarkempi kuvaus on kappaleessa 4.4.

Ajantasaisen simuloinnin ensimmäiset järjestelmät toteutettiin 1990-luvun loppupuolella, jolloin digitaalinen tiedonvälitys runkoverkon avulla yleistyi. Saksalaisessa Gerhard-Mercator -yliopistossa on kehitetty mikrosimulointijärjestelmä, jonka syötetietona käytetään ajantasaista liikennetietoa mallinnettavalta alueelta. Esser ja Schreckenbergen (1997) toteuttivat ajantasaisen simulointijärjestelmän, joka perustui soluautomaattimalliin. Mallinnusjärjestelmään on lisätty algoritmi, joka ennustaa lyhyen aikavälin liikennemuuтокset. Algoritmi käyttää syötetietona reaaliaikaisen ja vanhemman liikennetiedon yhdistelmää (Chrobok jne 2001). Sovelluksesta on toteutettu palvelu Internetiin. Palvelun avulla tienkäyttäjät voivat tarkistaa miten liikennetilanteen oletetaan muuttuvan mallinnettavalla alueella seuraavan tunnin aikana (Mullins 2004).

Ajantasaisen liikennetiedon hyödyntämistä simuloinnissa on tutkittu myös Teknillisen korkeakoulun ja Nottinghamin Trent yliopiston yhteistyönä. Tutkimuksessa kehitettiin simulointijärjestelmä, joka toteuttaa sen hetkistä liikennetilannetta simulointimallissa. Siinä käytettiin HUTSIM-simulointiohjelmistoa, SCOOT valo-ohjausjärjestelmää sekä

liikennetiedon tallentavaa DIME-tietokantajärjestelmää. Järjestelmä toteutettiin Englannissa, Mansfieldin kaupungissa. Tutkimuksen toteutuksesta on tarkempi kuvaus kappaleessa 4.4.

Tietotekniikan tuomia mahdollisuuksia liikennesuunnittelussa on tutkittu Teknillisen korkeakoulun liikennelaboriorion DigiTraffic-tutkimushankkeessa. Aiemmin kehitettyjä järjestelmiä hyödyntäen ajantasainen simulointijärjestelmä olisi mahdollista toteuttaa myös suomalaisessa liikennejärjestelmässä. (Kosonen jne 1999, Kosonen 2003a.)

1.2. Tavoitteet

Simulointia käytetään liikenteen suunnittelutyövälineenä, mikä luo paineita sen kehittämiselle. Liikenteen simuloinnin realistisuutta halutaan lisätä, jotta se tuottaisi todellempaa tietoa liikenteestä ja sen tulokset olisivat päteviä suunnittelussa.

Nykyinen tekniikka luo uusia mahdollisuuksia kehittää liikenteen simulointia. Mallin tarkkuutta voidaan parantaa muun muussa yhdistämällä simulointiohjelmistoon tietoverkon avulla muita järjestelmiä, jotka tuottavat digitaalisesti tarkempaa ja todellisempaa tietoa. Työn tavoitteena on yhdistää HUTSIM-mikrosimulointiohjelmistoon EC-1 kojesimulaattori ja ajantasainen liikennetietojärjestelmän, joka tuottaa automaattisesti liikenneverkkomalliin syötettävien ajoneuvo-olioiden ajankohdan. Tutkimuksessa hyödynnetään viimeisintä teknologiaa, josta on muodostettu uudentyyppinen järjestelmä.

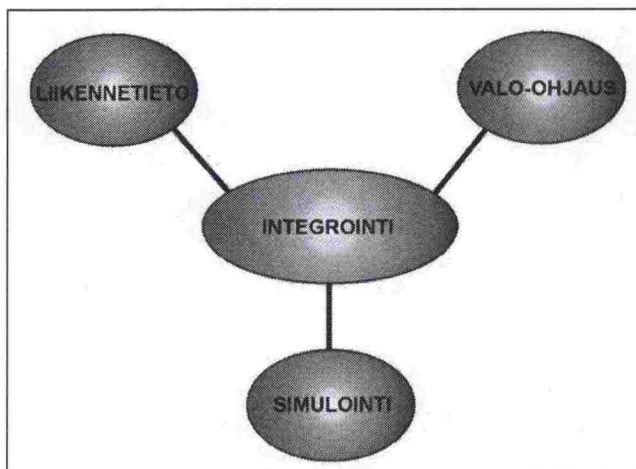
Järjestelmäarkkitehtuuri suunnitellaan niin, että tulevaisuudessa jatkokehitystyö on mahdollisimman vaivatonta. Simulointiohjelmistoon liitetään järjestelmiä, jotka toimivat myös erillään. Tällöin niiden lisääminen ja poistaminen rajapintojen avulla ei muuta perusjärjestelmän toimintaideaa. Simulointijärjestelmän valmistuttua liikenteen simulointiohjelmistoa voidaan edelleen käyttää vanhaan tapaan ilman verkkorajapintoja. Myös simulointiohjelmistoon yhdistetyt itsenäiset järjestelmät toimivat ilman liikenne simulaattoria.

Kehitetty järjestelmä tullaan testaamaan sekä teknisesti että toiminnallisesti. Tekninen testaus toteutetaan tarkastelemalla järjestelmän tietoliikenneyhteyden eheyttä. Testauksessa varmistetaan, että viestit saapuvat perille ja ohjelmistot toimivat viestien sisällön mukaisesti. Järjestelmän toimivuus testataan tapaustutkimuksella, jossa simuloidaan valitun testialueen valo-ohjausta. Toimivuustestauksen tavoitteena on tutkia kuinka käytännöllinen kehitetty järjestelmä on ja miten se toimii suunnittelutyövälineenä. Samalla pyritään parantamaan alueen valo-ohjausta. Tämän tutkimuksen puitteissa

resurssit valo-ohjauksen kehittämiseksi jäävät vähäiseksi. Tutkimuksessa keskitytään simulointijärjestelmän toteuttamiseen ja sen toimivuuden testaamiseen.

1.3. Tutkimuksen rajaus

Tavoitteeksi asetetun simulointijärjestelmän kehitys mahdollistaa monenlaisen liikennetiedon hyödyntämisen liikennetilanteen simuloinnissa. Aihealue rajattiin valo-ohjauksisten liittymien mikrosimulointijärjestelmään, jossa käytetään ajantasaista liikennetietoa. Rajaukseen vaikutti olemassa oleva laitteisto, joka oli valmiina kyseiseen järjestelmään. Tutkimuksessa käytettiin HUTSIM-mikrosimulointiohjelmistoa, jonka lähdekoodiin on mahdollista toteuttaa tarvittavat verkkorajapinnat. Nykyisillä valo-ohjauslaitteilla voidaan kerätä reaaliaikasta liikennetietoa ja lähettää sitä paketteina Internetin kautta simulointilaboratorioon. Ajantasaisen liikennetiedon lisäksi liikennemalliin yhdistettiin kokesimulointiohjelmisto, jota kutsutaan EC-1 kokesimulaattoriksi. Se tuottaa todellisten kojeiden mukaista valo-ohjausta. Liikennevalojen laitetoimittaja antoi valmiin kokesimulaattorin tutkimuskäyttöön tätä työtä varten. (Kuva 1.)



Kuva 1. Kehitetyn simulointijärjestelmän aihealueet.

Valmiin laitteiston lisäksi aiheen rajaukseen vaikutti tämäntyyppisen suunnittelutyön kysyntä. Liikenteen simuloiminen tarvittavalla tarkkuudella on tehokas suunnittelun apuväline. Ohjauksen sujuva ja turvallinen toiminta liittymän liikennetilanteissa halutaan varmistaa jo suunnittelun aikana. Erilaisten valo-ohjausohjelmien testaus todellisessa liikennetilanteessa on liikenneturvallisuuden ja sujuvuuden kannalta arveluttavaa.

Liikennemalliin syötetään ajantasaisesti mallinnettavalle alueelle saapuvat ajoneuvot. Se ei takaa, että mallin liikennetilanne on todenmukainen, sillä esimerkiksi mallin ajoneuvojen reitit simuloidaan kuten ennenkin. Järjestelmään olisi mahdollista toteuttaa

myös ajantasainen liikennetilanne, mutta sen kehittäminen olisi kasvattanut tutkimuksen liian laajaksi.

Tapaustutkimuksen testialueeksi valittiin Tuusulassa kantatiellä 45 sijaitsevat kolme peräkkäistä liittymää (Vanha Tuusulantie, Itäinen ohikulkutie ja Haukantie). Näistä eteläisin on ensimmäinen valo-ohjauksinen liittymä moottoritien päätyttyä. Tapaustutkimuksen toteutus rajattiin kahteen vaiheeseen. Ensin mallinnettiin alueen sen hetkinen liikennetilanne ja valo-ohjauksen toimivuus. Tämän jälkeen valo-ohjausparametreja muutettiin ja malli simuloitiin uudelleen. Uusien valo-ohjausparametrien toimivuutta testattiin edellisen simuloinnin liikennetilanteella, jotta nykytilan ja uuden ohjelman tuottamia viivytystuloksia voidaan vertailla keskenään.

Kehitetty simulointijärjestelmä on osa liikennelaboratorion DigiTraffic-tutkimushanketta. Hankkeessa pyritään kehittämään liikennetelematiikan palveluja tietokonemallinnuksen avulla ja, kuten tässä työssä on tehty, kehittämään liikennemallinnusta liikennetelematiikan tarjoamien palvelujen avulla (Kosonen 2003a). Työ on tehty Teknillisen korkeakoulun liikennelaboratoriossa ja sen on tilannut Uudenmaan tiepiirin Liikennepalveluyksikkö. Tutkimuksen aikana on tehty kehitysyhteistyötä Peek Trafficin suomen ja ruotsin osastojen kanssa.

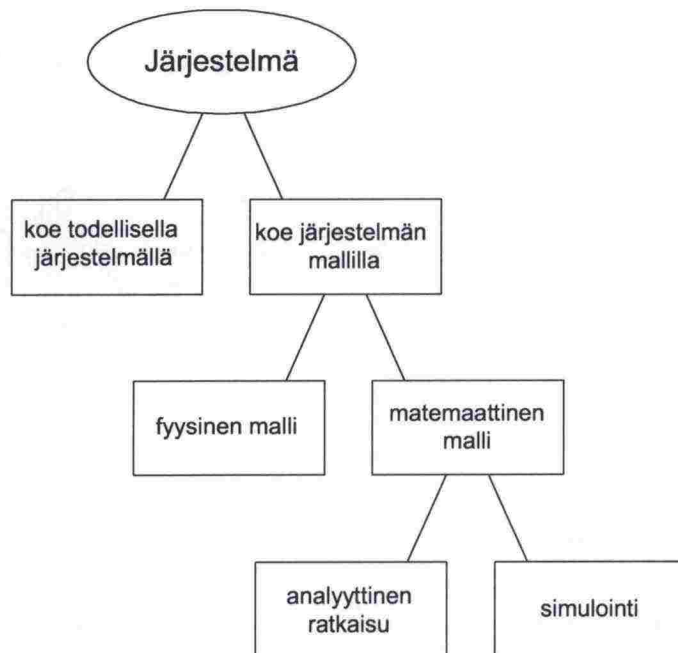
1.4. Käsitteistö

Simulointia käytetään yleensä mallinnettaessa todellisia laitteistoja tai tapahtumasarjoja eli prosesseja, joita voidaan kutsua myös järjestelmiksi. Joukko erillisiä kokonaisuuksia, jotka toimivat yhdessä saavuttaakseen jonkin loogisen lopputuloksen, muodostavat järjestelmän. Jotta järjestelmiä voitaisiin tutkia tarkemmin, niistä on yleensä tehtävä oletuksia. Tavallisesti nämä oletukset ovat joko matemaattisia tai loogisia. Oletukset muodostavat mallin, joka pyrkii selvittämään kuinka järjestelmä toimii. (Law, Kelton 2000.)

Tarpeeksi yksinkertaisesta mallista voidaan toteuttaa analyyttinen ratkaisu, jonka selvittämiseksi käytetään matemaattisia menetelmiä kuten algebraa, laskentaa ja todennäköisyyslaskua. Analyyttisen mallin antama tulos on tarkka. Tulosta voidaan edelleen käyttää uusissa analyyttisissä malleissa, ja tulos pysyy edelleen yhtä tarkkana. Kuitenkin, useimmat todellisen elämän tapahtumat ovat liian monimutkaisia mallinnettavaksi analyyttisesti. Tällöin järjestelmää on tutkittava simuloinnin avulla. Simuloinnissa käytetään tietokonetta arvioimaan mallia numeerisesti, ja kerätään tietoa järjestelmästä, jotta voidaan arvioida haluttu todellinen mallin piirre. (Law, Kelton 2000.)

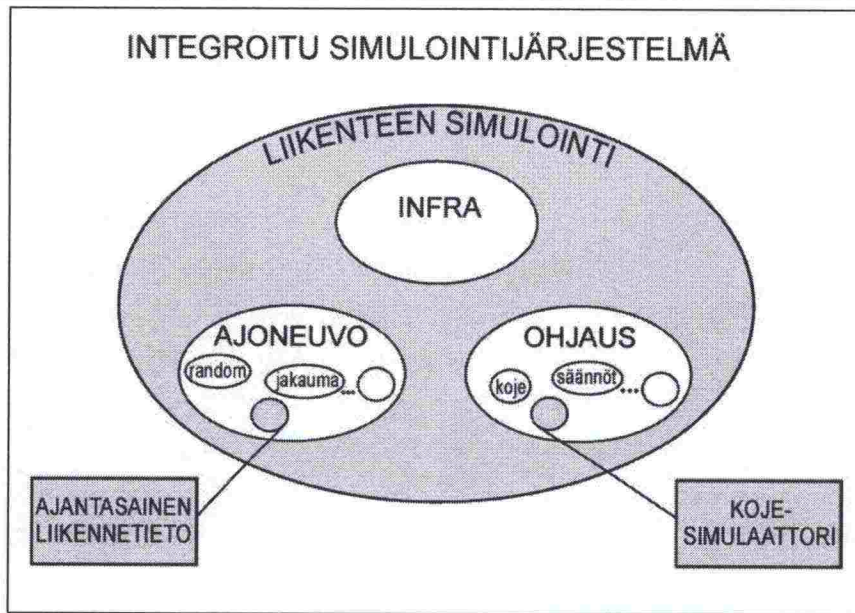
Simulointi tarkoittaa todellisuuden dynaamista ja stokastista mallintamista, mikä osittain erottaa sen analyyttisestä mallintamisesta. Simuloinnissa osa tiedoista syötetään malliin tietyn todennäköisyysjakauman perusteella satunnaisesti ja tarkastellaan miten se vaikuttaa simuloinnin lopputulokseen. Analyyttisessä mallissa ei ole stokastista vaihtelua. Simulointimalliin liittyy aina aikaulottuvuus, jota ei välttämättä käytetä analyyttisessä mallissa. Mitä kauemmin mallia simuloidaan, sitä paremmin se mallintaa järjestelmää. (Law, Kelton 2000.)

Kuvassa 2 on esitetty erilaisia tapoja tutkia todellista järjestelmää. Kaavion avulla on selvitetty miten simulointimallinnus on ymmärretty tämän tutkimuksen puitteissa. (Law, Kelton 2000.)



Kuva 2. Erilaisia tapoja tutkia todellista järjestelmää (Law, Kelton 2000).

Tutkimuksen tavoitteeksi asetettu simulointijärjestelmän toteutus sisältää yksittäisten järjestelmien yhdistämistä toimivaksi kokonaisuudeksi. Tällaisten erillisten ohjelmistojen ja laitteistojen muodostamaa kokonaisuutta kutsutaan integroiduksi simulointijärjestelmäksi. Työn keskeisimmät osa-alueet ja niiden yhteys toteutettuun järjestelmään on kuvattu oheisessa kaaviossa (kuva 3).



Kuva 3. Integroitu simulointijärjestelmä.

Liikenteen simuloinnissa pyritään mallintamaan liikennetilannetta tietyssä infrastruktuurissa mahdollisimman realistisesti. Liikenteen simulointi tarvitsee mallin, jolle kerätään mallinnettavalta alueelta lähtötietoja. Simuloinnin avulla malliin syötetään satunnaisesti esimerkiksi ajoneuvo-olioita ja valitaan niille satunnaisesti ominaisuuksia kuten nopeus ja kulkureitti. Simulointimäärittelyn mukaan liikenteen mallintaminen simuloinnin avulla on perustuttava stokastiseen vaihteluun. Ajantasaisessa simuloinnissa osa mallin tiedoista kerätään reaaliaikaisesti mallinnettavalta alueelta. Jos liikennetilanne voidaan mallintaa siten, että kaikki tarvittavat tiedot saadaan todellisesta tilanteesta, mallin toteutusta ei voida kutsua simuloinniksi. Tämä tarkoittaa sitä, että myös ajantasaisessa simuloinnissa osa tarvittavista tiedoista saadaan malliin satunnaisesti kuten tavallisessa simuloinnissa. Jos halutaan tarkkailla todellista liikennetilannetta tietokoneen avulla ja liikenteen muutokset saadaan syötettyä ajantasaisesti tarvittavalla tarkkuudella ohjelmistoon, puhutaan ajantasaisesta liikenteen mallintamisesta.

Liikenteen simuloinnissa mallin lähtötietona annetaan infrastruktuuri, jota ilman liikennetilannetta ei voida mallintaa. Ajantasaisesti simulointimalliin voidaan syöttää esimerkiksi liikennemäärä. Tällöin malliin syötetään ajoneuvo-oliot mallinnettavalle alueelle saapuvien todellisten ajoneuvojen mukaan. Osa tarvittavista tiedoista, kuten ajoneuvojen nopeudet, ajodynamiikka ja reitinvalinta, syötetään edelleen jakauman perusteella satunnaisesti, joten kyseessä on simulointimalli.

Liikenteen ohjaus voidaan toteuttaa joko sisäisesti esimerkiksi liikennesääntöjen ja -merkkien tai valo-ohjauksen avulla. Ohjaus voidaan myös tuottaa erilliseltä kokesimu-

laattorilta, joka simuloi todellisen kojeen toimintaa. Kojesimulaattorille annetaan lähtötietona valo-ohjauksen parametreja, joiden perusteella se simuloi liikennevalojen toimintaa antamalla opastinkuville niiden sen hetkiset tilatiedot. (Kuva 3.)

Tutkimuksen tavoitteena on kehittää integroitu simulointijärjestelmä, joka tuottaa mahdollisimman todellista tietoa liikennetilanteesta. Järjestelmä saa jatkuvalla syötteellä mallinnettavalta alueelta liikennetietoa, jonka perusteella simulointiohjelmisto syöttää malliin ajoneuvo-oliot. Kehitetty simulointijärjestelmä simuloi edelleen muun muassa ajoneuvo-olioiden ajodynamiikan, nopeuden ja reitinvalinnan. Integroidussa simulointijärjestelmässä valo-ohjaus toteutetaan erillisen ohjelmiston eli EC-1 simulaattorin avulla. Ohjelmiston algoritmit tuottavat tarkalleen samanlaista valo-ohjausta kuin mallinnettavalla alueella olevat todelliset kojeet. Integroitua simulointijärjestelmää voidaan käyttää valo-ohjelmien suunnittelussa.

2. LIIKENTEEEN VALO-OHJAUSJÄRJESTELMÄ

2.1. Liikenteen ohjauksen tavoitteet

Liikenteelle on ominaista kysynnän keskittyminen tiettyihin huippu aikoihin, mikä aiheuttaa ongelmia liikennejärjestelmissä. Kysynnän vaihdellessa vuorokauden aikana järjestelmän rakenteiden joustamattomuus voi aiheuttaa järjestelmän ylikuormitusta. Tällöin kysyntä ylittää tarjonnan ja alueelle muodostuu liikenneluuhkaa.

Liikenteen paikallinen ruuhkautuminen vaikuttaa myös laajemman alueen sujuvuuteen. Ruuhka voi alkaa paikallisesti, esimerkiksi yhden liittymän kysynnän kasvaessa, mutta ylikysynnästä muodostuneen jonon takia se voi levitä laajalle alueelle ja kestää kauan. Ruuhkautumisen vaikutukset näkyvät erityisesti kaupunkiympäristössä, jossa liittymien tiheys on suuri ja jono voi mahdollisesti tukkia myös edellisen liittymän. Ylikysynnän aikana muodostuneiden jonojen takia liittymän liikennetilanteen palautuminen tasapainoon vie aikaa vielä ylikysynnän päättymisen jälkeen. Tilanteen helpottamiseksi ei ole aina mahdollista rakentaa uusia väyliä tai lisäkaistoja, jotka pirstovat olemassa olevaa kaupunkirakennetta ja vaativat huomattavia taloudellisia uhrauksia. Toinen ratkaisu paikallisen ylikuormituksen estämiselle voi olla liikenteen ohjauksen muuttaminen, jolloin kustannuksiltaan vähäisillä toimenpiteillä parannetaan liikenteen sujuvuutta. (Kosonen 1999, Pursula 1990.)

Sujuvuuden lisäksi liikennejärjestelmän toinen tärkeä mitta on sen liikenneturvallisuus. Hyvään liikenneturvallisuuteen on edellytykset, kun autoilijoiden, pyöräilijöiden ja jalankulkijoiden on helppo käyttäytyä liikenneympäristön edellyttämällä tavalla (*Tiehallinto* 1996). Liikennemäärien ja -järjestelmien koon kasvaessa liikenneturvallisuus usein heikkenee. Liikenteen ohjauksella pyritään parantamaan liikennejärjestelmän turvallisuutta muun muassa vähentämällä liittymissä syntyviä epävarmoja tulkintatilanteita, joissa eri osapuolet voivat toimia eri tavalla aiheuttaen vaaratilanteita.

Liikenteen ohjauksella tarkoitetaan sujuvuuden ja liikenneturvallisuuden edistämistä palvelevia muita kuin tien rakenteeseen kohdistuvia toimenpiteitä ja järjestelyjä. Se voidaan jakaa kahteen ryhmään, noudatettavaan ohjaukseen ja informoivaan opastukseen. Noudatettavaan ohjaukseen liittyy juridisia pakotteita tai kulkua rajoittavia esteitä. Informointi sen sijaan ei velvoita noudattamaan ohjeita, vaan sen päätarkoituksena on neuvoa reittiä tai suuntaa. Liikenteen ohjaus voi olla pysyvää kuten liikennemerkit ja tiemerkinnot tai se voi olla muuttuvaa kuten liikennevalo-ohjaus. (Nokela ym. 1980, Sane 1990.)

Liittymän toimivuuden yksi parannuskeino on valo-ohjaus. Liikennevalot eivät kuitenkaan ole ainoa keino toteuttaa turvallinen ja sujuva liittymä, vaan liittymän toimivuutta voidaan parantaa myös rakentamalla kiertoliittymä, lisäämällä kaistoja ja korokkeita sekä asettamalla sivusuunnille väistämisvelvollisuus. Vilkasliikenteiseen liittymään voidaan rakentaa myös eritasoliittymä. (Tiehallinto 1996.)

Valo-ohjauksen tarpeeseen vaikuttavat ensisijaisesti ajoneuvo- ja jalankulkijamäärät sekä liikenneturvallisuus. Tarve lisääntyy liikennemäärän kasvaessa. Yleensä tarpeellisuuden määrittämisessä käytetään valo-ohjauksettoman liittymän kuormitusastetta, joka kertoo liittymän liikennemäärän suhteessa välityskykyyn. Jos kuormitusaste on suurempi kuin 0,7, liittymän palvelutaso on välttävä tai jopa huono ja valo-ohjaus on perusteltu liikenteen sujuvuuden varmistamiseksi. Kuormitusasteen ollessa 0,5–0,7 liikennevalojen tarpeen määrää ensisijaisesti liikenneturvallisuus, sillä liittymän palvelutaso ilman valoja on tyydyttävä. Asteen ollessa alle 0,5, liikenteen sujuvuus on hyvä ja valojen tarve harkitaan ainoastaan liikenneturvallisuuden perusteella. (Tiehallinto 2001a.)

Valo-ohjauksisessa liittymässä liikennöinti on suoritukseltaan yksinkertaisempaa kuin valo-ohjauksettomassa liittymässä. Liikennevaloliittymässä epävarmat tulkintatilanteet on minimoitu yksiselitteisellä ohjauksella. Liikenteen sujuvuus mitataan valo-ohjauksisissa liittymissä viivytysten, pysähtyvien osuuden ja viivytyksettä liittymän läpäisevän liikenteen osuuden perusteella. Vähäisillä liikennemäärillä valo-ohjaus voi heikentää liittymän sujuvuutta, sillä esimerkiksi suoja-ajat ja jalankulkijoiden vihreät pidentävät ajoneuvoliikenteen odotusaikoja. Valo-ohjauksettomissa liittymissä pääsuunnalla on yleensä etuajo-oikeus, jolloin valo-ohjaus heikentää pääsuunnan liikenteen sujuvuutta. Vilkasliikenteisillä teillä tai kaduilla valo-ohjauksen vaikutus liittymän kokonaissujuvuuteen on yleensä myönteinen. Ainakin sivusuunnan liikenteen sujuvuus koheenee liikennevalojen ansiosta. Liittymän sujuvuutta tulisi tarkastella viivytysten lisäksi myös liikenteen pysähdysten määrän perusteella. Pääsuunnan liikenteelle pysähdysten määrä tulisi olla merkittävin sujuvuustekijä. Vilkasliikenteisillä tiheän liittymän väylillä liikennevalojen yhteen kytkennällä saadaan liikenne sujumaan mahdollisimman vähin pysähdyksin, mikä parantaa sujuvuuden lisäksi myös alueen liikenneturvallisuutta. (Tielaitos 1996.)

2.2. Valo-ohjauslaitteet

2.2.1. Opastimet

Ajoneuvoliikennettä ohjataan pääopastimella ja ainakin yhdellä toisto-opastimella. Nämä yhdessä muodostavat opastinryhmän. Toisto-opastimilla on aina sama opastinkuva kuin pääopastimella. Opastinryhmä ohjaa vain yhden tulosuunnan liikennettä, mutta

yhdellä tulosuunnalla voi olla useampia opastinryhmiä. Esimerkiksi kääntyville ajoneuvoille voi olla oma opastinryhmä. Yhden opastinryhmän ohjaamaa liikennettä kutsutaan osatulosuunnaksi. Liikennesimuloinnissa, jossa ei tarvitse välittää kuljettajan mahdollisista näköesteistä, opastinryhmä on korvattu yhdellä opastimella. (Kosonen 1999, Tiehallinto 1996.)

Pääopastin sijoitetaan ennen liittymää opastimella ohjattavan tulosuunnan oikealle puolelle tai yläpuolelle. Opastimen ja ohjattavan tulosuunnan välissä ei saa olla kaistaa, jota ei ohjata tällä opastimella. Jos vasemmalle kääntyville on oma kaista, sijoitetaan opastin kaistan vasemmalle puolelle. Pääopastin sijaitsee ajoneuvon kulkusuunnassa pysäytysviivan jälkeen vähintään metrin ja enintään viiden metrin päässä viivasta. Se on kuitenkin aina ennen suojatietä, jotta kuljettaja tietää mihin on viimeistään pysähdyttävä, jos esimerkiksi pysäytysviiva näkyy huonosti. (Tiehallinto 1996.)

Toisto-opastimen tehtävänä on näyttää valon vaihtuminen pysäytysviivan kohdalla oleville ajoneuvon kuljettajille. Se parantaa liikennevalojen havaittavuutta varsinkin, jos liittymässä on useita kaistoja. Jokaisen kuljettajan tulisi nähdä vähintään joko pääopastin tai yksi toisto-opastin. (Tiehallinto 1996.)

2.2.2. Ilmaisimet

Ilmaisimia käytetään havaitsemaan liikkuvat ja pysähtyneet ajoneuvot tai jalankulkijat. Yleensä valo-ohjauksinen liittymä on varustettu useilla ilmaisimilla, jotka keräävät liikennetietoa eri suunnista. Käytännössä ilmaisin toimii lähettämällä signaaleja, joiden arvo riippuu ilmaisinalueen varauksesta. Jos ilmaisin on varattu, bitin arvo on yksi, muuten sen arvo on nolla. (Kosonen 1999, Tiehallinto 1996.)

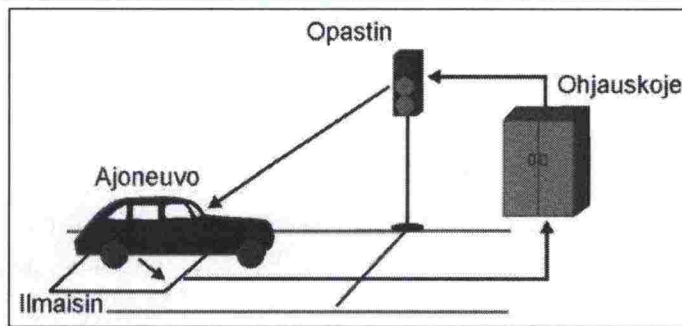
Ilmaisintyyppejä ovat muun muassa silmukkailmaisin, infrapunailmaisin ja tutkailmaisin sekä painonappi kevyelle liikenteelle (Tiehallinto 1996). Yleisimmin ajoneuvoliikenteen havaitsemisessa käytetään silmukkailmaisinta, joita on kahta eri päätyyppiä, läsnäoloilmaisin ja kulkuilmaisin (Tiehallinto 1996). Silmukkatyyppien ainoa ulkoinen eroavaisuus on pituus. Läsnäoloilmaisimen huomattavasti kulkuilmaisinta pidempi. Kojeen ilmaisilogiikka käsittelee ilmaisintyyppien pyynnöt eritavalla. Kulkuilmaisimen pyyntö jää kojeen muistiin. Läsnäoloilmaisimen varaus puolestaan vaikuttaa valojen toimintaan sen hetken, kun ajoneuvo on ilmaisimen päällä ja muutaman sekunnin sen jälkeen. Jos kulkuilmaisimen on kaistakohtainen, sitä voidaan käyttää myös liikennemäärien laskemisessa. Ilmaisimesta analysoitu liikennetiedon tarkkuus riippuu lähettävien viestien välisestä ajanjakson pituudesta.

Silmukkailmaisimessa induktiosilmukka on asennettu maahan ja yhdistetty yhdyskaapelilla kojeeseen lisättyyn vahvistinyksikköön. Ilmaisinvahvistimessa voi olla 2–8 kanaavaa, joista jokaiseen yhdistetään yhden ilmaisimen tiedot. Ilmaisinvahvistimesta tieto johdetaan ilmaisilogiikan kautta kojeen ohjausyksikköön. Yksi ilmainen voi ohjata useampaa ilmaisilogiikkaa. Jokainen ilmaisilogiikka ohjaa vain yhtä opastinryhmää. (Kosonen 1999, Tiehallinto 1996)

Valo-ohjauksessa ilmaisimien tehtävänä on yleensä pyytää ja pidentää vihreää valoa. Läsnaöloilmaisimien lähettää ohjauskojeelle tiedon liittymäaluetta ylittävästä ja pysäytysviivalla odottavasta ajoneuvosta. Jos läsnäoloilmaisimien on yli kahdeksan metrin päässä risteävän ajoradan reunasta, läsnäoloilmaisimelle asetetaan muistipyyntö. Opastinkuvan ollessa punainen läsnäoloilmaisimen päällä seisova ajoneuvo aiheuttaa jatkuvan vihreän valon aloituspyynnön. Tällöin estetään turha vihreän pyyntö, jos ajoneuvo on jatkanut matkaa punaisen opastinkuvan aikana. Jos valo-ohjauksella on kiinteä vihreän aloitus, läsnäoloilmaisimien ei ole pakollinen. Kulkuilmaisimien lähettää ohjauskojeelle tiedon lähestyvistä ajoneuvosta. Ilmaisimien yli ajaneen ajoneuvon vihreän pyyntö tai pidentäminen on voimassa logiikan määrittelemän ajanjakson. Vihreän aikana ilmaisimien ylittävää ajoneuvo pidentää vihreää pidennysaikavälin verran. Tämän aikana ajoneuvo ehtii seuraavalle ilmaisimelle tai lähelle pysäytysviivaa. Jos pidennyksen aikana ei tule uutta ilmaisua, ilmaisilogiikka lopettaa vihreän pidennyksen. Kulkuilmaisimien avulla etsitään saapuvasta ajoneuvovirrasta sopiva aikaväli, jolloin vihreä voidaan turvallisesti lopettaa. Kulkuilmaisimien päällä seisova ajoneuvo ei aiheuta jatkuvaa vihreän pyyntöä tai pidentystä. (Luttinen 1994, Tielaitos 1996.)

2.2.3. Ohjauskoje

Toiminnan kannalta valo-ohjauksen tärkein osa on ohjauskoje. Se määrää muun muassa valojen suoja-ajat, vaiheistuksen ja toimintalogiikan. Niiden perusteet on selvitetty seuraavassa kappaleessa. Koje vastaanottaa ilmaisimien keräämää liikennetietoa ja antaa opastimelle käskyn, kun opastinkuva muutetaan seuraavaan. Liikennetieto-ohjauksessa koje, ilmainen ja opastin sekä ajoneuvo muodostavat yhtenäisen tiedonsiirtoympyrän. Ajoneuvo tarkkailee opastinta, ilmainen havaitsee ajoneuvon, koje saa liikennetietoa ilmaisimelta ja antaa käskyjä opastimelle, jota ajoneuvo noudattaa. (Kuva 4.) Laitteiden lähettämät viestisignaalit kulkevat kaapelia pitkin ja niiden välillä on yksinkertaiset rajapinnat vastaanottamassa ja lähettämässä tietoa. (Kosonen 1999.)



Kuva 4. Valo-ohjauslaitteiden ja ajoneuvon välinen yhteys. (Kosonen 1999.)

2.3. Valo-ohjauksen periaatteet

Valo-ohjaus voidaan toteuttaa usealla eri tavalla. Muun muassa ohjelmien valinta, vaiheistustapa ja valo-ohjauksisten liittymien mahdollinen yhteenkytkentä tekevät valo-ohjauksista erilaisia. Valo-ohjaus voidaan kategorisoida näiden ominaisuuksien mukaan erilaisiin luokkiin, jotka ovat keskenään rinnakkaisia. Jonkun ryhmittelyluokan tietyn ryhmän ominaisuudet voivat esiintyä toisen luokan kaikkien ryhmien valo-ohjaustavoissa. Ohessa selvitetään kolme erilaista luokittelutapaa.

Ohjaustavat voidaan ryhmitellä sen mukaan miten suunnitellut valo-ohjausohjelmat valitaan. Valo-ohjauksen suunnittelu perustuu liikennemääriin ja niiden vaihtelumuotoihin. Säännönmukaisen vaihtelun perusteella voidaan määritellä valo-ohjelmat ja niiden toiminta-ajat. Nykyiset liikennevalot toimivat joko etukäteen määrätyllä aikaohjauksella tai liikennemäärien vaihteluun mukautuvalla liikennetieto-ohjauksella. (Luttinen 1994.)

Aikaohjatussa valo-ohjauksessa koje antaa opastimelle käskyt etukäteen määritetyn ajoituksen mukaisesti. Valo-ohjaus mukautuu liikennemäärien vaihteluihin ohjelmavaihtojen avulla. Koska ohjelmanvaihto aiheuttaa ylimääräisiä häiriöitä ja se perustuu meneeseen liikennetilanteeseen, ohjelma tulee vaihtaa vasta, kun liikennetilanteessa tapahtuu merkittävä muutos. Jokaisella ohjelman vaihdolla on häiriön määrään perustuva haitta. Tämän on oltava pienempi kuin se haitta, joka muodostuu ohjelman jäädessä samaksi. Ongelmana on pidemmän aikavälin aikana kehittynyt kysynnän muutos, jota ei ole pystytty etukäteen ennakoimaan. Liikenteen satunnaisvaihtelusta seuraa yleensä välityskyvyn hukkakäyttöä, koska kaikkien tulosuuntien liikennemäärät harvoin vastaavat mitoitusti liikennettä samanaikaisesti. Tällöin vihreät ajat eivät vastaa todellista tarvetta, mikä aiheuttaa ylimääräistä viivytystä liikenteelle. (Luttinen, Nevala 2002, Luttinen 1992.)

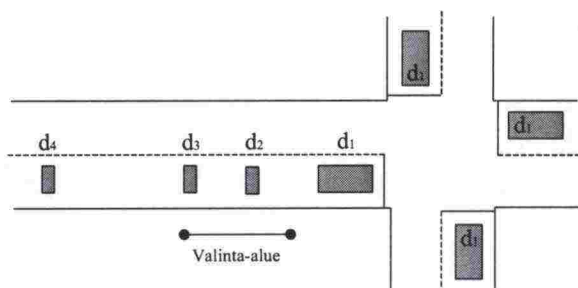
Liikennetieto-ohjauksessa vihreän ajan pituudet säädetään saapuvan liikenteen mukaisesti, jolloin ohjaus adaptoituu sekä liikennetilanteen muutoksiin että liikenteen satun-

naisvaihteluihin. Liikennetieto-ohjauksessa kiertoaika riippuu tulosuuntien liikennemäärästä. Poikkeuksena ovat yhteenkytketyt liikennevalot, jolloin kaikissa liittymissä käytetään samaa kiertoaikaa. Erillisohjatuissa liikennevaloissa kiertoaika voi olla pienempi kuin etukäteen määritetty maksimikiertoaika. Tämä johtuu liikennevalojen vaihtelevasta vihreän ajan pituudesta. Osatulosuunnan vihreä kestää vähintään minimivihreän ajan ja se voi olla kestoaltaan lyhyempi kuin maksimiaika. Vihreä voi myös jäädä kokonaan toteutumatta, jos osatulosuunnalla ei ole liikennettä. (Kosonen 2003b, Luttinen, Nevala 2002, Tiehallinto 1996.)

Nykyisin Suomessa yleisimmin käytetty menetelmä perustuu aikavälin etsintä -algoritmiin (*gap-seeking algorithm*). Vihreän valon pituuden määrää tulosuunnasta tulevien ajoneuvojen aikaväli. Vihreä päättyy, kun kahden ajoneuvon välinen aikaväli on tarpeeksi suuri tai vihreä saavuttaa maksimiaikansa. Vihreä voi jatkua myös maksimiajan jälkeen, jos törmäysuhkasuunnilla eli konfliktiryhmien tulosuunnilla ei ole pyyntöä. Menetelmän hyvä puoli on sen yksinkertaisuus, jonka vuoksi sitä käytetään pohjoismaiden useimmissa liittymissä. Se ei vaadi monimutkaisia algoritmeja tai matemaattisia kaavoja selvittääkseen monihaaraisen liittymän tulosuuntien ohjauksesta. Toisaalta, vain yhden tulosuunnan huomioiminen kerrallaan ei optimoi koko liittymän viivytystä. Esimerkiksi konfliktiryhmän opastinkuva ei muutu vihreäksi, jos vihreänä olevan opastinryhmän liikenteen aikavälit eivät ylitä raja-arvoa, vaikka konfliktiryhmän kysyntä on suurempi kuin nykyisen vihreän valon saavan liikenteen kysyntä. Liittymän kokonaisuuden kannalta menetelmä ei siis tuota tehokkainta mahdollista ohjausta. (Kosonen 2003b, Luttinen, Nevala 2002, Tiehallinto 1996.)

Ohjaustavan voi korvata toisella algoritmilla, jos se parantaa liittymän sujuvuutta tai liikenneturvallisuutta. Algoritmin voi vaihtaa esimerkiksi sumean logiikan valo-ohjaukseen, jolloin ilmaisimen varaus vaikuttaa ohjaukseen eri tavalla.

Liikennetieto-ohjauksessa tarvitaan yleensä ilmaisimet jokaiselle tulosuunnalle. Yleensä tulosuunnalla on useampi ilmaisin varsinkin, jos kyseessä on pääsuunta (Kuva 5).



d_1 = läsnäoloilmaisim

d_2, d_3, d_4 = kulkuilmaisim

Kuva 5. Tyypillinen ilmaisinjärjestely (Luttinen, Nevala 2002)

Toinen tapa ryhmitellä erilaisia valo-ohjauksia on tarkastella niiden vaiheistusta, joihin opastinryhmät jaotellaan suunnitteluvaiheessa. Samaan vaiheeseen kuuluvat opastimet näyttävät vihreää yhtä aikaa. Vaiheistusluokittelussa on kaksi ryhmää – opastinryhmäohjaus ja vaihejakoon perustuva ohjaus. Opastinryhmäohjauksessa opastinryhmät toimivat itsenäisesti ja ne voivat kuulua useampaan peräkkäiseen vaiheeseen (Tiehallinto 1996). Opastinryhmäohjauksen vaiheistuksen suunnittelusta on tarkempi kuvaus kappaleessa 2.4.2.

Liittymän tulosuuntien sujuvuuden kannalta opastinryhmäohjausta jäykempi vaiheistus toteutetaan vaihejakoon perustuvassa valo-ohjauksessa. Siinä tulosuunnat jaetaan vaiheisiin, joiden alussa kaikki siihen kuuluvat opastinryhmät vaihtuvat vihreäksi ja lopussa kaikki muuttuvat jälleen punaisiksi. Jäykäksi ohjaustavan tekee se, että kaikki vaiheeseen kuuluvat opastinryhmät ovat koko vaiheen keston ajan vihreänä. Vain vaiheen pituus voi vaihdella.

Valo-ohjauksen voi ryhmitellä myös sen mukaan, miten eri liittymissä olevat liikennevalot toteuttavat alueellista valo-ohjausta. Liittymän valo-ohjaus voi toimia erillisohjauksella tai yhteenkytkettynä muihin lähiliittymien liikennevaloihin. Erillisohjauksessa liittymän valo-ohjaus toimii itsenäisesti eli siihen ei vaikuta toisten liittymien liikennetilanteet. Sen etuna on toiminnan joustavuus liikennemäärien vaihdellessa. Yleensä erillisohjauksessa tulosuunnan punaiselle valolle löytyy konkreettinen syy samasta liittymästä. Se voi olla esimerkiksi risteävällä suunnalla lähestyvä ajoneuvo, mikä mahdollisesti tekee odottamisesta mielekkäämmän. Yhteenkytkennällä tarkoitetaan kahden tai useamman lähekkäin sijaitsevan liikennevalo-ohjauksisen liittymän kojeiden synkronointia. Synkronointi rajoittaa mahdollisuuksia hyödyntää liikennetieto-ohjausta. Yhteenkytkennällä saadaan aikaan vihreäaalto, joka tarkoittaa liikenteen suoraa etenemistä tietyllä nopeudella liittymästä toiseen mahdollisimman vähin pysähdyksin. Yhteenkytkettyjen valo-ohjauksisten liittymien suunnittelusta on tarkempi kuvaus kappaleessa 2.5. (Tiehallinto 1996.)

2.4. Opastinryhmäohjaus

2.4.1. Yleiskuvaus

Edellisessä kappaleessa selvitettiin muutama luokittelutapa, jotka määrittävät yleisellä tasolla valo-ohjauksen toteutuksen. Suomessa valo-ohjaus on toteutettu lähes poikkeuksetta opastinryhmäohjauksena. Se voi olla aika- tai liikennetieto-ohjattua ja voidaan toteuttaa erillisohjauksena tai yhteenkytkettynä muihin lähellä sijaitseviin valo-ohjauksiin liittyviin. Yleisin liittymissä toteutettu valo-ohjelma perustuu liikennetieto-ohjaukseen, joka käyttää aikavälin etsintä -algoritmia.

Suomen korkealuokkaisten väylien valo-ohjaus on modifioitu ruotsalaisesta LHOVRA-valo-ohjausmenetelmästä. Se perustuu opastinryhmäohjaukseen ja toteuttaa aikavälin etsintä -algoritmia, johon on lisätty useita lisäominaisuuksia. LHOVRA on pääosin tarkoitettu yksittäisten liittymien valo-ohjaukseen, mutta sen toimintoja voidaan hyödyntää myös yhteenkytketyissä valo-ohjausliittymissä. Suunnittelun lähtökohtana oli, että päätien nopeusrajoituksena on 70 km/h. Sen kehittämisen päätavoitteena oli liittymien turvallisuuden parantaminen sekä valoista aiheutuvan keskimääräisen viivytyksen ja pysähdysten määrän vähentäminen pääteillä. Tavoitteiden toteutuksessa onnistuttiin niin hyvin, että ohjausmenetelmää toteutetaan laajasti Pohjoismaissa, erityisesti Ruotsissa. Kehitetyn valo-ohjauksen nimi koostuu kuuden ruotsinkielisen sanan etukirjaimista. Sanat kuvaavat ohjauksen toteuttavia toimintoja (*taulukko 1*). (Kronborg 1992.)

Taulukko 1. LHOVRA-ohjauksen toiminnot. (Al-Mudhaffar1998)

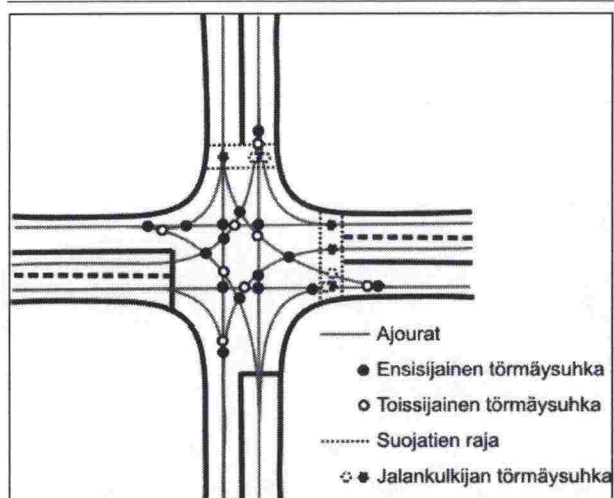
L	Raskaan liikenteen ja joukkoliikenteen etuisuus (Lastbilsprioritering)
H	Pääteiden etuisuus (Huvudledsprioritering)
O	Onnettomuuksien vähentäminen (Olycksreduktion)
V	Muuttuva keltainen (Variabelt gröngult)
R	Muuttuva punainen (Rödkörningskontroll)
A	Kokopunainen lepotila (Allrödvänding)

Suomessa käytettyjä opastinryhmäohjauksen sujuvuus- ja turvallisuustoimintoja on selvitetty kappaleissa 2.4.6 ja 2.4.7. Toiminnot toteutetaan yksittäisten parametrien avulla. Jokainen opastinryhmä saa yksilölliset parametrien arvot, joiden mukaan koje toteuttaa muun muassa suoja-aikojen hallinnan, vaiheringin sekä ilmaisain ja opastinlogiikan. Näiden ominaisuuksien ja käsitteiden ymmärtäminen on oleellista valo-ohjauksen suunnittelussa.

Valo-ohjauksen tärkein turvallisuustekijä on suoja-aikojen hallinta. Sillä estetään törmäysuhkatulosuunnista tulevien ajoneuvojen saapuminen konfliktialueelle samanaikaisesti (Tiehallinto 1996). Vaiherinki varmistaa, että opastinryhmä saa jokaisen kierron aikana vihreän aloitusluvan tarvittaessa (Kosonen 1999). Kojeen ilmaisainlogiikkaa käytetään liikennetieto-ohjauksessa. Sen avulla ajoneuvojen vihreän kysyntä käsitellään ilmaisimilta opastinryhmien opastinkuviksi (Tiehallinto 1996). Ilmaisainlogiikka vaihtaa opastinkuvan vihreälle tai pidentää vihreää ajoneuvojen aiheuttaman pyynnön mukaisesti (Tiehallinto 1996). Opastinlogiikka määrittelee muun muassa opastinkuvien minimien ja maksimien ajalliset kestot.

2.4.2. Vaiheistus

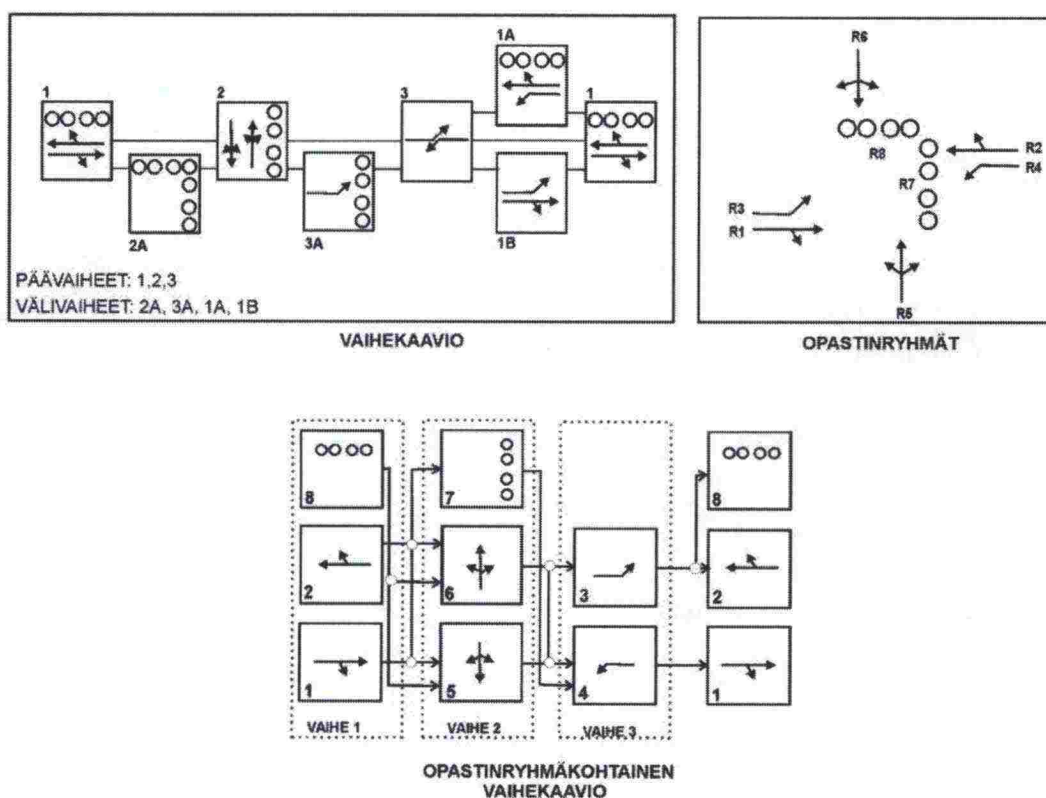
Opastinryhmät ajoitetaan vähintään kahteen *vaiheeseen*, jolla estetään ensisijaiset törmäysuhat. Näitä ovat ristikkäin suoraan ajavat ajoneuvot, ristikkäin kääntyvät ja suoraan ajavat ajoneuvot sekä suoraan ajavat ajoneuvot ja jalankulkijat. Kun halutaan estää myös toissijaisia törmäysuhkia, tarvitaan useampia vaiheita. Toissijaisia törmäysuhkia ovat vasemmalle kääntyvät ja vastaan tulevat ajoneuvot, vasemmalle kääntyvät ajoneuvot ja jalankulkijat sekä oikealle kääntyvät ajoneuvot ja jalankulkijat (Kuva 6.). (Tiehallinto 1996.)



Kuva 6. Ajouriin perustuvat törmäysuhkapisteet nelihaaraliittymässä.

Vaiheiden lisääntyessä liittymän liikenneturvallisuus yleensä paranee. Eri suuntiin kulkevat ajoneuvot ja jalankulkijat saavat mennä omassa vaiheessa eikä heidän tarvitse väistää muita liikkuja. Monivaiheisuus kuitenkin heikentää liittymän sujuvuutta. Monet erilliset vaiheet lisäävät hukka-aikaa, joka tarkoittaa kiertoajan ja tehollisten vihreiden ajallisen keston erotusta. Tehollisen vihreän aikana liittymä kykenee välittämään tulosuunnan liikennettä ominaisvälityskyvyn mukaisesti. Teholliseen vihreään lasketaan vihreä aika ja puolet keltaisen kestosta. Tulosuunnan purkautumisliikennemäärä alkaa kasvaa maksimiinsa, kun opastinkuva vaihtuu vihreäksi ja alkaa heiketä vihreän lopussa ja valojen muututtua keltaiseksi. (Tiehallinto 1996.)

Opastinryhmä kuuluu yhteen tai useampaan vaiheeseen. *Vaihejärjestys* kertoo missä järjestyksessä vaiheet toteutetaan. Sen tarkoituksena on priorisoida samaan aikaan tulevat vihreän pyynnöt. Toiminto ei määrää tulosuuntien vihreän tarpeellisuutta, vaan järjestää vaiheet niin, että konfliktiryhmien opastimet eivät ole samaan aikaan vihreänä. Vaihejärjestys esitetään vaihekaaviolla, johon merkitään päävaiheet ja niiden välissä mahdollisesti esiintyvät välivaiheet. (Tiehallinto 1996.)



Kuva 7. Opastinryhmän vaihekaavio

Kuvassa 7 on esitetty opastinryhmäkohtainen vaihekaavio, jossa jokainen laatikko kuvaa yhtä opastinryhmää. Laatikkojen väliset nuolet osoittavat opastinryhmien välisiä riippuvuuksia. Nuolen osoittama opastinryhmä ei pääse vihreälle ennen kuin nuolen toisen pään opastinryhmät eli edellisen vaiheen konfliktiryhmän vihreät ovat päättyneet. Vaihekaaviossa on kuvattu päävaiheet ja välivaiheet. Jos kahden peräkkäisen päävaiheen opastinryhmistä osa voi olla samaan aikaan vihreänä, ne muodostavat päävaiheiden väliin välivaiheen. Välivaihe on mahdollista toteuttaa, jos edellisessä päävaiheessa olevat välivaiheen konfliktisuuntien opastinryhmien vihreät ovat kestoaltaan maksimivihreää lyhyemmät. Välivaiheet mahdollistavat joidenkin tulosuuntien vihreän toistumisen usean vaiheen aikana, jolloin valojen toiminta on joustavampaa. Kuvasta 7 voi huomata, että eri päävaiheessa olevat osatulosuuntien R3 ja R7 opastinryhmät voivat olla yhtä aikaa vihreänä, joten ne muodostavat välivaiheen 3A. Eri päävaiheessa olevat kevyen liikenteen opastinryhmät R7 ja R8, voivat muodostaa välivaiheen ensimmäisen ja toisen päävaiheen väliin. Samasta suunnasta tulevien R1 ja R3 opastinryhmät voivat olla samaan aikaan vihreänä, vaikka ne kuuluvat eri päävaiheisiin. Samasta syystä myös tulosuuntien R2, R4 ja R8 opastinryhmät voivat olla samaan aikaan vihreänä. (Tiehallinto 1996.)

Kun kaksi opastinryhmää muuttuu samassa vaiheessa vihreäksi, määrää aloitusviive vihreän aloitusjärjestyksen. Määräävän ryhmän vihreän alkamisen jälkeen viivytettävän tulosuunnan vihreä voi alkaa vasta aloitusviiveen jälkeen. Jos määräävä vihreä jää pyynnön puuttuessa punaiseksi, aloitusviive ei viivytä muiden tulosuuntien opastinryhmien vihreän aloitusta. Sekavaiheessa vastakkaisten liittymähaarojen ajoneuvoliikenteelle näytetään vihreää samanaikaisesti. Etuvihreä ei ole sallittu, mikä tarkoittaa, ettei opastinryhmä, jonka liikenne on väistämismuuttuva, saa tulla vihreäksi ennen väistettävän vihreän opastinryhmää. Väistämismuuttuvuuden mukaisesti vasemmalle kääntyvien opastin ei saa muuttua sekavaiheessa vihreäksi ennen kuin vastakkaisen tulosuunnan suoraan ajavien tai oikealle kääntyvien tai väistettävän kevyen liikenteen opastinkuva on muuttunut vihreäksi. (Tiehallinto 1996.)

2.4.3. Suoja-aika ja vaihtumisaika

Suoja-aika tarkoittaa vähimmäisaikaa, joka tarvitaan opastinryhmän vihreän päättymisen ja konfliktiryhmän vihreän alkamisen välillä. Sen tarkoituksena on varmistaa, että opastinryhmän vihreän lopussa pysäytysviivan ylittänyt ajoneuvo ehtii pois konfliktialueelta ennen kuin seuraavan vaiheen konfliktiryhmän ajoneuvo ehtii kyseiselle alueelle. Samoin se varmistaa myös, että suojatiellä oleva jalankulkija ehtii punaisen vaihduttua tien yli tai seuraavalle korokkeelle ennen kuin risteävän tulosuunnan ajoneuvo ehtii suojatielle. *Vaihtumisaika* on liikennevaloissa toteutuva vähimmäisaika eri opastinryhmien vihreiden välissä. Konfliktiryhmien välillä vaihtumisaika on vähintään suojajan mittainen. Se voi olla myös pidempi kuin suojaja-aika. Vaihtumisajalla voidaan porrastaa samassa vaiheessa vihreäksi vaihtuvia opastinryhmiä. (Tiehallinto 1996.)

Suoja-ajaan (T) lasketaan keltaisen kesto (t_k) ja pysäytysviivan ylittäneen ajoneuvon poistumisaika (t_p). Luvusta vähennetään seuraavan opastinryhmän vihreän alkaessa ensimmäisen ajoneuvon saapumisaika konfliktialueelle (t_s).

$$T = t_k + t_p - t_s$$

(1)

Suoja-aika pyöristetään kokonaisluvuksi, siten että luku pyöristetään alaspäin jos ylitys on enintään 0,33 sekuntia, muuten ylöspäin. (Tiehallinto 1996.)

Punaisen opastinkuvan jälkeen tuleva yhden sekunnin mittainen punakeltainen sisältyy suojaja-ajaan. Kiinteän keltaisen kesto on kolme sekuntia, jos nopeusrajoitus on 30-50

km/h, neljä sekuntia nopeusrajoituksen ollessa 60 km/h ja viisi sekuntia, jos nopeusrajoitus on 70 km/h. (Tiehallinto 1996.)

Poistumisajan laskenta perustuu oletukseen, että viimeinen ajoneuvo ohittaa pysäytysviivan, kun keltainen opastinkuva muuttuu punaiseksi. Aika lasketaan jakamalla poistumismatkan (l_p) ja ajoneuvon pituuden (m) summan poistumisnopeudella (v_p).

$$t_p = \frac{l_p + m}{v_p}$$

(2)

Ajoneuvon poistumismatka on ajoneuvon etäisyys pysäytysviivasta törmäysuhkapisteeseen. Poistumismatkassa on otettava huomioon ajoneuvon pituus, sillä suoja-ajan aikana ajoneuvon on ehdittävä ajamaan kokonaan pois törmäysuhka-alueelta. Opastinryhmien törmäysuhkapisteet määritetään ajourien perusteella (kuva 3). Ajoneuvon poistumisnopeus on 10 m/s, jos ajoneuvo jatkaa suoraan, ja 8-7 m/s, jos se kääntyy. Jalankulkijalla poistumismatka on suojatien tai sen osan pituus ja sen poistumisnopeus on 1,2 m/s. (Tiehallinto 1996.)

Saapumisajan laskenta perustuu oletukseen, että ensimmäinen ajoneuvo ohittaa pysäytysviivan, kun punakeltainen opastinkuva vaihtuu vihreäksi. Saapumisaika saadaan, kun jaetaan saapumismatka (l_s) saapumisnopeudella (v_s).

$$t_s = \frac{l_s}{v_s}$$

(3)

Saapumisaikaa laskiessa ei tarvitse ottaa huomioon ajoneuvon pituutta, sillä yhteen-törmäykseen riittää, kun saapuvan ajoneuvon etupää on törmäysuhka-alueella. Koska poistumisajassa ei otettu huomioon reaktioaikaa, ei sitä huomioida saapumisajassakaan. Saapumisnopeus riippuu nopeusrajoituksesta ja ajoneuvon liikkeistä. Kääntyville ajoneuvoille ja 50 km/h nopeusrajoitusalueella saapumisnopeus on 11 m/s. Jos nopeusrajoitus on 60 km/h, saapumisnopeus on 13 m/s, ja 70 km/h nopeusrajoitusalueella se on 16 m/s. Jalankulkijoiden saapumismatka on 0 metriä, joten heidän saapumisnopeudellansa ei ole merkitystä saapumisaikaan. Kun opastinryhmällä ohjattavan tulo-suunnan liikenne voi kulkea eri suuntiin, valitaan vaihtoehtoisista törmäysuhkapisteistä se, jonka suoja-aika on pisin. (Tiehallinto 1996.)

2.4.4. Kiertoaika

Kriittinen polku on kiertoaikaa määrittävä tekijä. Kriittisellä polulla tarkoitetaan eri vaiheissa olevien konfliktiryhmien kaistoja, jotka yhdessä muodostavat ajoituksen mitoitettavat kaistat. Osatulosuunnan mitoitettavalla kaistalla ajoneuvojen purkautuminen vie eniten aikaa eli sen suhteellinen liikennemäärä on suurin suunnan kaistoista. Tulosuunnan i suhteellinen liikennemäärä $y(i)$ lasketaan jakamalla kaistan mitoitusliikennemäärä (q) kaistan ominaisvälityskyvyllä (s).

$$y = \frac{q}{s}$$

(4)

Kun kääntymissuunnalla on käytössään enemmän kuin yksi kaista, liikenne jaetaan kaistoille mikäli mahdollista ominaisvälityskyvyn suhteessa. Jos jokin opastinryhmä esiintyy kahdessa eri vaiheessa, molemmat vaiheet on tutkittava yhdessä ja otettava huomioon peräkkäisten vaiheiden välissä oleva suoja-aika, joka ei vaikuta kahden peräkkäisen vaiheen vihreänä olevaan tulosuuntaan. (Tiehallinto 1996.)

Valo-ohjauksen *kiertoaika* määräytyy kriittisen polun suhteellisten liikennemäärien summan ($\sum y$), suoja-aikojen summan ($\sum T$) ja keltaisten aikojen summan ($\sum t_k$) avulla. Suoja-aikojen summasta vähennetään puolet keltaisen ajallisen keston summasta, joka kuuluu teholliseen vihreään.

$$c = \frac{1,5 \times (\sum T - 0,5 \times \sum t_k) + 5}{1 - \sum y}$$

(5)

Saatu kiertoaika sekunteina pyöristetään ylöspäin lähimpään viidellä jaolliseen lukuun. Optimoidulla kiertoajalla minimoidaan liittymän viivytykset. Liittymän välityskyky kasvaa kiertoajan pituuden kasvaessa, sillä suoja-aikojen merkitys pienenee tulosuuntien vihreän pidentyessä. Vaikutus kuitenkin vähenee kiertoajan pidentyessä. Pidemmän kiertoajan suhteellisesti saman pituinen pidennys parantaa liittymän välityskykyä huomattavasti vähemmän kuin lyhyen kiertoajan pidennys. Pisin suositeltava kiertoaika on noin 120 sekuntia, vaikka pidempi kierto voisi hieman vähentää liittymän viivytyksiä. Merkittävää muutosta ei kuitenkaan kyseisen aikarajan jälkeen tapahdu, ja toisaalta pitkään kestävät punaiset houkuttelevat erityisesti jalankulkijoita kulkemaan opastinkuvan ollessa punainen. (Tiehallinto 1996, Luttinen 1983.)

2.4.5. Vihreän ajallinen kesto

Valo-ohjauksen lähtökohtana on liittymän välityskyvyn ja liikenneturvallisuuden maksimointi, johon pystytään vaikuttamaan eri tulosuuntien opastinryhmien *vihreän ajan* suunnittelulla. Vihreän tulee päättyä liikenneturvallisuuden kannalta oikeassa kohdassa. Vihreän päättyminen suunnitellaan siten, ettei se aiheuta vaaratilanteita tai heikennä merkittävästi liittymän sujuvuutta. Vihreän tulee jatkua vähintään punaisen valon aikana kertyneen jonon purkautumisen ajan tai muuten liikenteen kysyntä kasvaa jokaisen kierroksen aikana. (Tiehallinto 1996.)

Valo-ohjauksen yksi perustoiminto on minimivihreän toteuttaminen. Opastinryhmä näyttää vihreää valoa vähintään minimivihreän ajan. Minimivihreä on kaikissa ohjelmissa saman mittainen. Jos tulosuunnalla on ainoastaan kulkuilmaisoin, minimivihreä on 6–10 sekuntia. Läsnaöoloilmaisimilla varustetussa liittymässä minimivihreä on 3–6 sekuntia. Vaihteluun vaikuttavat muun muassa osatulosuunnan keskimääräinen liikennemäärä ja mahdollisen suojatien yhden osan pituus. Jos suojatiessä ei ole keskisaareketta, jalan- kulkijoiden minimivihreä on vähintään 8 sekuntia. (Tiehallinto 1996.)

Liikenneohjatun vähimmäisvihreän aikana opastinryhmä voi olla pyynnöstä vihreänä minimiä pidempään eikä valo vaihdu edes joukkoliikenteen tai palokunnanohjauksen pakkopyynnöstä. Vihreän päättyminen heti minimivihreän jälkeen saattaa erityisesti vilkkaan liikenteen aikana aiheuttaa liikenneturvallisuutta heikentäviä tilanteita kuten punaista päin ajoa. Vähimmäisvihreän ero pidennettyyn minimivihreään on se, että vähimmäisvihreä toteutuu vain pyynnöstä. (Tiehallinto 1996.)

Opastinryhmä voi omassa vaiheessaan muuttua vihreäksi usealla eri tavalla. Yleinen vihreän pyyntötapa liikenneohjatuissa valoissa on oman tulosuunnan liikenteen pyyntö, joilla liikennevalojen toiminta on joustavaa. Kun ainoastaan oman tulosuunnan ajoneuvon pyyntö muuttaa opastinkuvan vihreäksi, opastinryhmä ei ole tarpeettomasti vihreänä. Tällöin se ei estä konfliktiryhmien opastinryhmien vaihtumista vihreäksi. Toinen tapa pyytää vihreää on kiinteä pyyntö, joka toteutetaan aikaohjauksessa. Kolmas tapa on oheispyyntö, jossa opastinryhmällä on mahdollisuus vaihtua vihreäksi ilman omaa pyyntöä. Opastinryhmä voi saada oheispyynnön sekavaiheessa, jossa toinen tulosuunta pyytää vihreää. Oheispyyntö voidaan toteuttaa silloin, kun vaihtuminen voi tapahtua muiden opastinryhmien vihreää lopettamatta eikä se viivästyttä seuraavan vaiheen aloittamista. (Tiehallinto 1996.)

Minimivihreän lisäksi myös *maksimivihreä* mitoittaa liikennevalo-ohjauksen toimintaa. Ruotsalaiseen menetelmään perustuvassa maksimivihreän ajan eli maksimiajan määri-

tyksessä lasketaan ensin jokaisen opastinryhmän perusvihreäarvo ($g_p(i)$). Se saadaan kertomalla opastinryhmän suhteellinen liikennemäärä ($y(i)$) maksimikiertoajalla (c). Perusvihreäarvo ei saa alittaa vähimmäisvihreää, joka on 8 sekuntia. Tämän jälkeen lasketaan kriittisen polun ylimääräinen vihreäaika (g_{ylim}), joka saadaan vähentämällä kiertoajasta kriittisen polun perusvihreän ja suoja-aikojen (T) summat. Jos vastaukseksi saadaan negatiivinen luku, täytyy kiertoaikaa pidentää. Positiivinen luku, eli ylimääräinen vihreäaika, jaetaan opastinryhmien kesken. (Tiehallinto 1996.)

- | | |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. $g_p(i) = y(i) * c$ | <p>Jos $g_p(i) > g_{väh}(i)$, ok</p> <p>Jos $g_p(i) < g_{väh}(i)$, suurennetaan $g_p(i)$</p> |
| 2. $g_{ylim} = c - \Sigma(g_p(i)) - \Sigma(T)$ | <p>Jos $g_{ylim} > 0$, jaetaan ylimääräinen vihreä</p> <p>Jos $g_{ylim} < 0$, pidennetään kiertoaikaa</p> |

Kuva 8. Maksimivihreän ajan laskenta

Ylimääräinen vihreä aika voidaan jakaa esimerkiksi pääsuunnan tai muun tärkeän ajosuunnan opastinryhmille tai vaiheelle, jossa on paljon jalankulkuliikennettä tai raskasta liikennettä. Se voidaan myös jakaa tasapuolisesti kaikille vaiheille. Maksimiaika ei saa olla niin pitkä, että kaistojen jonotilat täyttyvät säännöllisesti jopa liittymän pienillä kuormitusasteilla. (Tiehallinto 1996.)

Maksimiajan laskenta voidaan aloittaa opastinryhmän vaihtuessa vihreäksi. Toinen tapa on aloittaa laskeminen, kun konfliktiryhmä pyytää vihreää valoa oman opastinryhmän ollessa vihreänä. Tällöin vihreä aika voi vielä kestää maksimiajan riippumatta siitä, kuinka kauan opastinryhmä on ollut vihreänä. Konfliktiryhmän pyynnöstä alkava maksimivihreän käynnistystapa estää opastinryhmän vihreän äkillisen päättymisen ja vähentää muun muassa peräänajoriskiä. Maksimiajan laskenta voidaan myös aloittaa vaiheen alusta, vaikka opastinryhmän oman liikenteen pyynnön puuttuessa valo olisi jäänyt punaiseksi. (Tiehallinto 1996.)

Liikennetieto-ohjatuissa liikennevaloissa vihreän ajan pituus ei välttämättä kestä maksimiaikaa, vaan minimivihreän jälkeen opastinkuva voi vaihtua pidennysten puuttuessa punaiseksi. Toisaalta opastinryhmä voi jäädä vihreälle myös maksimiajan jälkeen, jos konfliktiryhmällä ei ole pyyntöä vihreälle. (Tiehallinto 1996.)

Kun liikennetieto-ohjatussa liittymässä ei ole pyyntöjä tai pidennyksiä, kyseessä on lepotila. Opastinryhmä voidaan asettaa lepotilana aikana vihreäksi, punaiseksi tai jättää siihen tilaan, jossa se lepotilan alkaessa oli. Kokopunaisessa lepotilassa kaikilla tulo-

suunnilla on punainen lepotila. Sitä käytetään, kun liittymään saapuva liikennemäärä on pieni (alle 400 ajoneuvoa vuorokaudessa), ja liikennevalojen on tarkoitus olla päällä jatkuvasti. Se aiheuttaa vähiten viivytyksiä ja pysähdyksiä, sillä ensimmäinen liittymään saapuva ajoneuvo saa vihreän valon. Kokopunainen lepotila edellyttää, että kaikilla suunnilla on läsnäoloilmaisimet, kulkuilmaisimet ja suojateillä painonapit. Kulkuilmaisimien etäisyys liittymästä on oltava vähintään 80–140 metriä riippuen nopeusrajoituksesta. Pääsuunnilla voidaan pitää vihreää lepotilaa, jos esimerkiksi niiltä puuttuvat läsnäoloilmaisimet. Pääsuunnalle voidaan myös jättää viimeinen vaihe lepotilaan. Tällöin kulkuilmaisimet on sijoitettava etäämmälle kuin kokopunaisessa lepotilassa. (Tiehallinto 1996.)

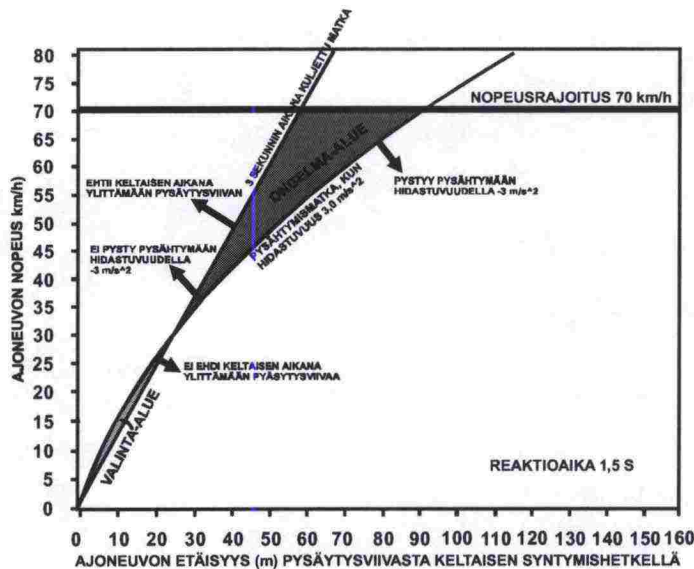
2.4.6. Minimitoiminnot turvallisuuden parantamiseksi

Opastinryhmän minimitoiminnot parantavat valo-ohjauksen liikenneturvallisuutta ja takaavat tyydyttävän liikenteen sujuvuuden. Minitoimintoja ovat valoihin pysähtyneen jonon purku, valinta-alueen tyhjennys ja vihreän alkupidennys. Myös lyhyen lepotilan toteutumisen esto on eräs minimitoiminto. Sen toteutusta ei ole tarkemmin selvitetty, sillä se ei ole merkittävä ohjaustoiminto tämän työn kannalta. (Tiehallinto 1996.)

Jonon purku -toiminto vihreän alussa estää vihreän päättymisen ennen kuin kertynyt jono on ylittänyt pysäytysviivan. Tämä varmistetaan joko asettamalla tulosuuntaa ohjaavalle opastinryhmälle pitkä kiinteä minimivihreä tai asettamalla opastinryhmälle lyhyt kiinteä minimivihreä ja muuttuva minimivihreä. Kiinteää minimivihreää käytetään pääsuunnalla yhteenkytketyissä liikennevaloissa. Vähäisen liikenteen aikana 10–15 sekunnin minimivihreä aiheuttaa kuitenkin ylimääräistä viivytystä. Tästä syystä vähäisen liikenteen liittymissä käytetään muuttuvaa minimivihreää, jos se on mahdollista. Muuttuvaa minimivihreää käytetään, kun tulosuunnan kulkuilmaisimien on kauempana kuin 10 metriä pysäytysviivasta. Tällöin pääsuunnan kiinteäksi minimivihreäksi asetetaan 8 sekuntia ja sivusuunnalle 6 sekuntia. Jos muuttuvan minimivihreän ajoituksessa käytetään ensisijaisesti läsnäoloilmaisinta, asetetaan pääsuunnan kiinteäksi minimivihreäksi 4–6 sekuntia ja sivusuunnalle 3–5 sekuntia. Muuttuvan minimivihreän maksimiarvo on pääsuunnalla 10–15 sekuntia ja sivusuunnalla 8–10 sekuntia. (Tiehallinto 1996.)

Liikennevalo-ohjauksen turvattomin aika on punaisen kahden ensimmäisen sekunnin ja sitä edeltäneen keltaisen aikana. Keltaisen aikana tulosuunnalle muodostuu ongelma-alue ja valinta-alue. Ongelma-alueella tietyllä nopeudella ajava kuljettaja ei pysty pysäyttämään ajoneuvoa pysäytysviivalle eikä myöskään ehdi ohittamaan pysäytysviivaa keltaisen aikana. Talvella liukkaan kelin aikana ongelma-alue on suurempi kuin hyvissä

olosuhteissa. Valinta-alueella kuljettaja pystyy sekä pysäyttämään pysäytysviivalle että ohittamaan sen keltaisen aikana. (Kuva 9.) Opastinkuvan vaihduttua vihreästä keltaiseen kuljettaja tekee oman ratkaisunsa liikennevaloihin pysähtymisen ja matkan jatkamisen välillä. Kuljettajien tekemät valinnat saattavat erota toisistaan. Päätökseen vaikuttavat muun muassa keltaisen pituus, ajoneuvon nopeus ja sen etäisyys pysäytysviivasta, keli sekä ajoneuvon ominaisuudet. (Tiehallinto 1996.)



Kuva 9. Tulosuunnanvalinta-alue ja ongelma-alue 3 sekunnin keltaisen aikana.

Kun valinta-alueella on kaksi tai useampia ajoneuvoja peräkkäin, on peräänajoriski olemassa. Risteämisonnettomuusriskiä lisää yksittäisen ajoneuvon kuljettajan valinta ajaa liittymäalueelle punaisen valon aikana. Onnettomuuden todennäköisyyttä pyritään pienentämään tyhjentämällä valinta-alue ennen kuin vihreä vaihtuu keltaiseksi. Tällaista vihreän turvallista lopetushetkeä etsitään *valinta-alueen tyhjennystoiminnolla*. Se on toteutettu LHOVRA-ohjauksessa onnettomuuksien vähentämistoimintona.

Valinta-alueen tyhjennystoiminto estää opastinryhmän vihreän päättymisen, jos valinta-alueelle saapuu ajoneuvo kyseiseltä tulosuunnalta. Ajoneuvot havaitaan alueen takarajalle asetetulla ilmaisimella (d_3 , kuva5), joka pidentää osatulosuunnan vihreää. Tämän turvin ajoneuvo ehtii seuraavalle kulkuihmäisimelle tai valinta-alueen eturajalle. Alueelle sijoitetaan myös toinen ilmaisim kolmanneksen lähemmäksi liittymää kuin alueen takarajalla sijaitseva ilmaisim. Normaalissa tilanteessa vihreä päättyy huolimatta valinta-alueella sijaitsevasta ajoneuvosta, jos opastinryhmän vihreän maksimiaika täyttyy eivätkä muut vaiheen vihreänä olevat ryhmät pidennä. Lopetusviive voi pidentää vihreän kestoa maksimiajan jälkeen. Lopetusviive on normaalia vihreän pidennystä lyhyempi, eikä se aiheuta muiden opastinryhmien vihreän pidennystä. Tiukennetussa valinta-

alueen tyhjennystoiminnossa vihreän päättymisen estetään vain, jos valinta-alueella on kaksi ajoneuvoa peräkkäin ja niiden aikaväli on enintään 2,5 sekuntia tai jos, lähemmän ilmaisimen ja pysäytysviivan välissä on yksikin ajoneuvo. (Tiehallinto 1996, Kronborg 1992.)

Kolmas minitoiminto turvallisuuden parantamiseksi on *vihreän alkupidennys*. Lyhyen minimivihreän hyvä puoli on sen pienentävä vaikutus kiertoaikaan ja siten sujuvuuden parantaminen, mutta joskus lyhyt minimivihreä saattaa aiheuttaa vaaratilanteita. Esimerkiksi kuljettaja, joka huomaa valojen vaihtuneen vihreäksi, lähestyy liittymää, mutta on koko vihreän ajan vielä valinta-alueen ulkopuolella. Hän ei välttämättä jatkuvasti tarkkaile opastimen tilaa ja minimivihreän päätyttyä kuljettaja voi ajaa liittymäalueelle opastinkuvan ollessa jo punainen. Jos alueen nopeusrajoitus on 70 km/h, tarvitaan valinta-alueen kulkuilmaisimien lisäksi myös vihreän alkupidennystoiminto. Sen avulla estetään vihreän päättymisen, jos ajoneuvo sijaitsee ongelmaetäisyyttä lähempänä liittymää. Toteutuksessa tarvitaan ilmaisimien ongelmaetäisyyden takareunalle (d_4). Ongelmaetäisyys (d_{alkuP}) lasketaan lisäämällä valinta-alueen takareunan ilmaisimen (d_3) etäisyyteen ($d_{valinta}$) minimivihreän aikana (g_{min}) nopeusrajoituksen vauhdilla (v) kuljettu matka.

$$d_{alkuP} = d_{valinta} + g_{min} * \frac{v-10}{3,6} \quad (6)$$

Minivihreän aikana ilmaisimelta tulevat varattu-signaalit pidentävät pääopastinryhmän vihreää niin, että sen aikana ajoneuvo ehtii valinta-alueen ilmaisimelle. Minimivihreän jälkeen ilmaisimien ei pidennä vihreän kestoa. (Tiehallinto 1996.)

2.4.7. Liikenneohjauksen sujuvuustoiminnot

Valo-ohjauksen sujuvuustoimintoja käytetään liittymissä, joissa painotetaan enemmän pääsuunnan pysähdysten määrää kuin keskimääräisen viivytyksen minimointia. Tällaisia liittymiä ovat vilkasliikenteisillä pääväylillä varsinkin, jos pääsuunnan ja sivusuunnan liikennemäärien erot ovat suuret. Tässä kappaleessa esitellään sujuvuustoiminnoista pääsuunnan vaiheen varaus, jononpidennystoiminto, vaiheen suunnittainen lopetus sekä keltaisen ja vaihtumisajan säätö. Näitä sujuvuustoimintoja voidaan mahdollisesti hyödyntää tutkimuksen koalueella Tuusulan valo-ohjauksisissa liittymissä. Muita Tiehallinnon määrittelemiä sujuvuustoimintoja ovat raskaan liikenteen etuisuus, joukkoliikenteen etuisuus ja optimointialgoritmit. (Tiehallinto 1996.)

Pääsuunnan vaiheen varaus estää sivusuunnan vaiheen käynnistymisen liikenteen sujuvuudelle haitallisella hetkellä. Kyseinen toiminto on toteutettu myös LHOVRA-valo-

ohjauksessa. Se toteutetaan lähinnä vähäisen kysynnän aikana. Vihreän varauksen toteuttaa pääsuunnan kauimmaisoin kulkuilmaisoin, joka on noin 200 metrin päässä liittymästä. Sen pyynnöstä vihreä valo varataan pääsuunnalle. Pääsuunnan opastinkuva ei heti muutu vihreäksi. Pynnön tapahtuessa pääsuunnan ajoneuvo on vielä kaukana liittymästä ja vihreän näyttäminen saattaisi nostaa pääsuunnan ajoneuvojen nopeuksia. Kun ajoneuvo ylittää valinta-alueen ilmaisimen, opastinryhmä vaihtuu vihreäksi eikä pääsuunnan ajoneuvo joudu pysähtymään liikennevaloihin. Sivusuunnan vihreää odotava kuljettaja hyväksyy pääsuunnan vaiheen varauksen, jos hän näkee pääsuunnalla liittymää lähestyvän ajoneuvon valo-ohjauksettoman liittymän kriittistä aikaväliä lähempänä. Tästä syystä varaavalla ilmaisimella (d_4) on maksimietäisyys liittymästä (d_{\max}). (Tiehallinto 1996, Kronberg 1992.)

$$d_{\max} = v_1 * \frac{t_s + t_{kr}}{3,6}$$

(7)

v_1 = pääsuunnan nopeusrajoitus

t_s = sivusuunnan ajoneuvon ajoaika kulkuilmaisimelta pysäytysviivalle

t_{kr} = valo-ohjauksettoman liittymän kriittinen aikaväli

(t_{kr} = 5,9 s, jos 50 km/h; 6,4 s, jos 60 km/h; 6,8 s, jos 70 km/h)

Toisaalta pääsuunnan vaiheen varauksesta ei ole hyötyä, jos varaava ilmaisimella ei ole tarpeeksi kaukana liittymästä, sillä ilmaisinta kauempana oleva ajoneuvo ei saa ehtiä pysähtymismatkan etäisyydelle liittymästä minimipituisen sivusuunnan vaiheen aikana. (Tiehallinto 1996.)

$$d_{\min} = v_1 * \left(\Delta T - \frac{v_1 - v_2}{a_j} \right) + s_j$$

(8)

v_1 = pääsuunnan nopeusrajoitus

v_2 = sujuvuustavoitteen mukainen miniminopeus

ΔT = sivusuunnan minimivihreä+vaihtumisajat-punakeltainen (minimilepotilan kesto)

s_j = jarrutusetäisyys, jossa kuljettaja viimeistään aloittaa jarrutuksen valon ollessa punainen (120 m, jos 70 km/h)

a_j = hidastuvuus = -1,5 m/s²

Toinen sujuvuustoiminto on *jonon pidennys*. Siinä pääsuunnan vihreän valon päättymisen estetään, vaikka tulosuunnan valinta-alue on tyhjä ja sivusuunnalla on auto odottamassa. Tällöin pääsuunnalla on liittymää lähestyttävä vähintään kolmen ajoneuvon jono. Ajoneuvojen on oltava valinta-alueen kulkuilmaisimen ja vaiheen varaustoiminnon

perusteella sijoitetun kulkulmaisimen (d_4) välissä ja ensimmäisen ja kolmannen ajoneuvon aikaväli saa enintään olla 5–6 sekuntia. Jononpidennystoiminnolla annettava vihreän pidennys mitoitetaan siten, että jonon viimeinen ajoneuvo ehtii sen turvin valinta-alueen kulkulmaisimelle. Toiminnolle asetetaan kuitenkin maksimiaika, joka on lyhyempi kuin valinta-alueen tyhjennystoiminnon (kts. 2.4.3) maksimiaika. Tämän maksimajan täytyttyä jono ei aiheuta vihreän pidentämistä. (Tiehallinto 1996.)

Myös sivusuunnan sujuvuutta voidaan parantaa heikentämättä merkittävästi pääsuunnan liikennöitävyyttä. Pääsuunnan vaiheen *suunnittainen lopetus* parantaa sivusuunnan sujuvuutta. Ilman suunnittaista vihreän lopetusta vihreän pidennys pidentää myös vastakkaisen suunnan vihreää. Tämä on silloin turhaa, kun vastakkaisella suunnalla ei ole vihreän pidennyspyyntöä. Jos vastakkaisen suunnan ilmaisimelle ehtii ajoneuvo ennen toisen suunnan pidennyksen päättymistä, jatkuu molempien suuntien vihreä uuden pidennyksen verran. Tämä vuoroittainen pidentäminen saattaa jatkaa vihreän kestoa maksimiaikaan asti. Jotta vihreä ei jatkuisi vähäisen liikenteen aikana liian helposti maksimiaikaan, voidaan vaiheen sopivaa päättymistä etsiä suunnittain. Tämä lyhentää kiertoaikaa ja siten lisää koko liittymän sujuvuutta. (Tiehallinto 1996.)

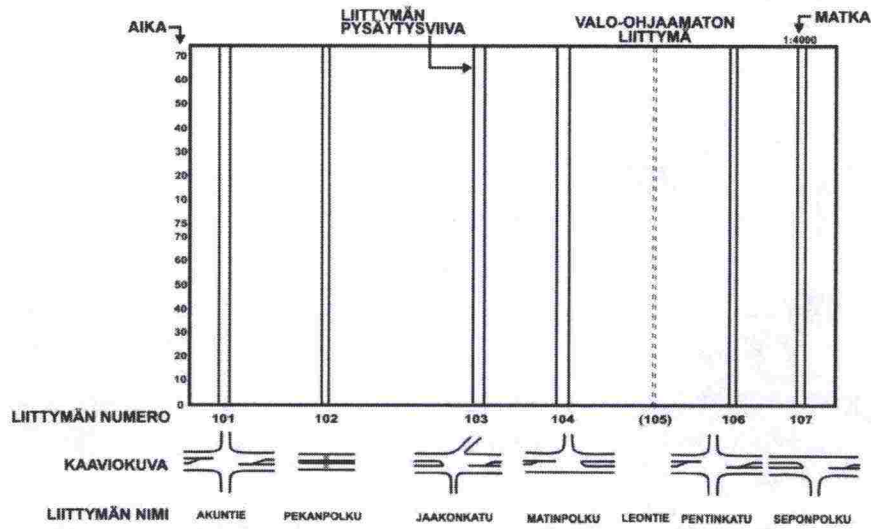
Muuttuva keltainen lyhentää valo-ohjauksen hukka-aikaa ja vähentää keskimääräistä viivytystä. Se parantaa sujuvuutta myös kysynnän huippuaikoina, jos joidenkin tulosuuntien liikennemäärät ovat vähäisempiä. Muuttuvan keltaisen minimiajan kesto on kaksi sekuntia. Ongelma-alueen (kts 2.4.6) pienentämiseksi keltaiselle on määrätty maksimikesto nopeusrajoituksesta riippuen ($50 \text{ km/h} \rightarrow 3 \text{ s}$; $60 \text{ km/h} \rightarrow 4 \text{ s}$; $70 \text{ km/h} \rightarrow 5 \text{ s}$). Muuttuvan keltaisen kesto voi siis vaihdella nopeusrajoituksesta riippuen sekunnin ja kolmen sekunnin välillä. Jos vihreän päättyminen valitaan siten, ettei valinta-alueella ole autoja, voidaan normaalimittaisen keltaisen sijaan käyttää minimikeltaista. Valinta-alueen ilmaisimilta lähetetyt pyynnöt määräävät keltaisen keston. Ne pidentävät keltaisen keston normaalin mittaiseksi, jos ilmaisimien päältä kulkee ajoneuvo. Muuttuvan keltaisen tuomia etuja hyödynnetään myös LHOVRA-ohjauksessa. (Tiehallinto 1996, Kronberg 1992.)

Keltaisen ajan vaihteluun liittyy myös *vaihtumisajan säätö*, jonka tarkoituksena on parantaa liittymän liikenneturvallisuutta. Lyhyen keltaisen aikana myös vaihtumisaika on normaalia lyhyempi. Minimikeltaista pidennetään, kun liittymää lähestyvä ajoneuvo voi saapua liittymään kahden ensimmäisen punaisen aikana. Myös keltaisen alkamista voidaan siirtää liikenneohjatusti. Vaihtumisaika voi olla joko 2–3 sekuntia lyhyempi tai pidempi kuin normaaliarvo. Vaihtumisajan pituuden säätö toteutetaan noin 80 metrin päässä liittymästä olevan ilmaisimen avulla. (Tiehallinto 1996.)

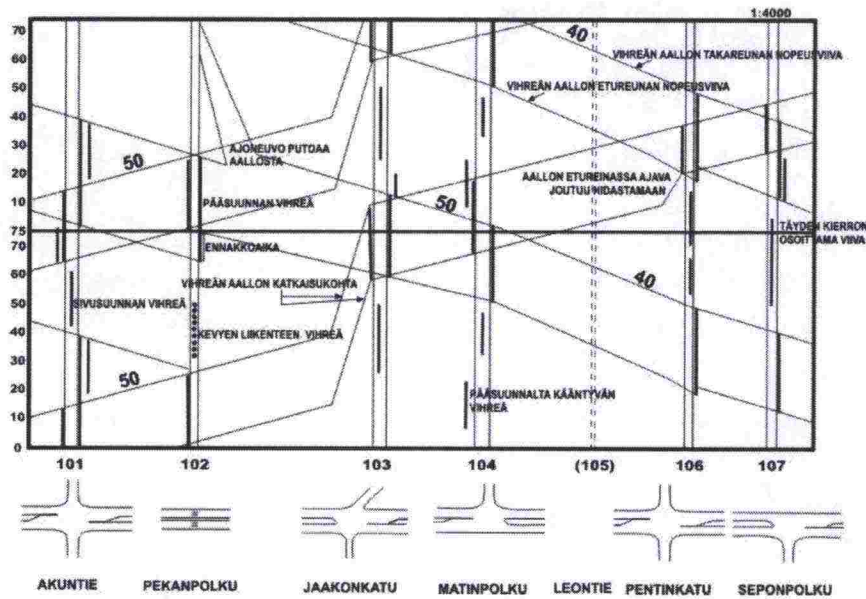
2.5. Yhteenkytketty valo-ohjaus

Valo-ohjauksisten liittymien yhteenkytkentä sopii väylälle, jossa liikenne etenee tasaisesti ja liikenteellisten häiriöiden määrä on pieni. Tästä johtuen keskusta-alueiden paikallisväylillä erilliskytkeä toimii paremmin, sillä esimerkiksi pysäköinti, valo-ohjaamattomat välisuojatiet ja tonttiliittymät aiheuttavat häiriöitä liikennevirtaan. Yhteenkytkettyjen valo-ohjausten väylästäöllä liittymien etäisyyksien tulee olla kohtuulliset. Enimmäisetäisyys riippuu muun muassa maaston muodoista. Jos pituuskaltevuus on suuri, liittymävälin enimmäispituus saa olla 500 metriä, jotta raskasliikenne ei aiheuta jonon hajautumista. Yhteenkytkentä soveltuu liittymiin, joissa kuormitusasteet ovat lähellä toisiaan. Liikennemäärältään vähäisellä tiejaksolla valo-ohjauksisten liittymien yhteenkytkennällä saavutetut edut ovat mitättömiä, jolloin helpommin suunniteltava erillisohjaus on järkevämpi vaihtoehto. (Tiehallinto 1996.)

Yhteenkytkennässä liittymien valo-ohjauksessa on oltava kiinteät kiertoajat, mikä asettaa suunnittelulle rajoituksia. Vihreää aaltoa suunniteltaessa on otettava huomioon, että pääsuunnan suoraan menevien opastinryhmät saavat mahdollisimman paljon samanaikaisesti vihreää, jotta myös sivusuunnille saadaan riittävä välityskyky kiertoajan aikana. Suunnittelun apuna käytetään yhteenkytkentäkaaviota. Se on matka-aikakaavio, jossa on ilmoitettu matka vaakakselilla ja aika pystyakselilla. Kaavioon merkitään liittymien paikat kahdella viivalla, jotka kuvaavat eri tulosuuntien pysäytysviivoja. Kiertoajat erotetaan toisistaan vaakaviivalla, joka ylettyy kaavion vasemmasta reunasta oikeaan reunaan. Kaavioon merkitään vihreän kesto liittymän läheisyydessä olevilla pystyviivoilla. Vihreän ajallinen kesto määrittää viivan pituuden. Pääsuunnan vihreät ovat pysäytysviivan kohdalla, sivusuunnan vihreä on pysäytysviivojen välissä ja pääsuunnan kääntyvien vihreä on pysäytysviivan etupuolessa. Ajoneuvoryhmien liike on piirretty kaltevilla viivoilla kuten matka-aikakaaviossa yleensä. Kaaviossa kuvataan vihreän aallon etu- ja takareuna. (Kuva 10 ja 11.) (Tiehallinto 1996.)



Kuva 10. Yhteenkytkentäkaavion pohja (Tiehallinto 1996).



Kuva 11 Yhteenkytkentäkaavio (Tiehallinto 1996).

Kaksisuuntaisella väylällä yhteenkytkennän onnistumiseen vaikuttavat liittymäväli, kiertoaika ja aallon mitoitussnopeus. Yhteenkytkentä on mahdollista, kun kaaviossa erisuuntien ajoneuvoryhmien liikeaallot kohtaavat liittymien kohdilla. Liittymien on siis sijaittava aaltojen risteyskohtien eli jakopisteiden lähellä. Kahden jakopisteen etäisyys (l_{jp}) määräytyy kiertoaajan (C) ja vihreän aallon mitoitussnopeuden (v_m) mukaan. Lausekkeen perusteella voidaan laskea sopiva kiertoaika liittymien etäisyyden ja mitoitussnopeuden avulla. (Tiehallinto 1996, Luttinen 1994.)

$$l_{jp} = \frac{c \cdot v_m}{2}$$

(9)

Yleensä valojen yhteenkytkentää suunniteltaessa liittymien fyysisiin paikkoihin ei voida vaikuttaa ja kaikkien liittymien jakopisteet eivät osu liittymiin. Tällöin mitoitusnopeutta muuttamalla pyritään saamaan jakopisteet liittymien tuntumaan. Vihreän aallon mitoitusnopeus (v_m) on yleensä 80–95 % väylän nopeusrajoituksesta (v). Laatutaso on hyvä, jos mitoitusnopeus on suurempi kuin $v-10$. Mitoitusnopeuksien raja-arvot asettavat jakopisteiden siirtämiselle rajat. Kun jakopisteitä ei saada liittymien lähelle, vihreän aallon takapää ”putoaa” aallosta ja ajoneuvot joutuvat odottamaan seuraavan kiertajan vihreää. Toinen vaihtoehto on, että aallon etupää ennättää seuraavaan liittymään ennen kuin sen opastinryhmä on vaihtunut vihreäksi. (Tiehallinto 1996.)

Kiertoaika määritetään aiemmin esitettyjen periaatteiden mukaisesti. Sen pituuteen vaikuttavat myös vihreän aallon nopeus, tarvittava välityskyky ja liittymäväli. Koska kaikilla vihreän aallon liittymillä on sama kiertoaika, määritetään se kuormittuneimman liittymän mukaan. (Tiehallinto 1996.)

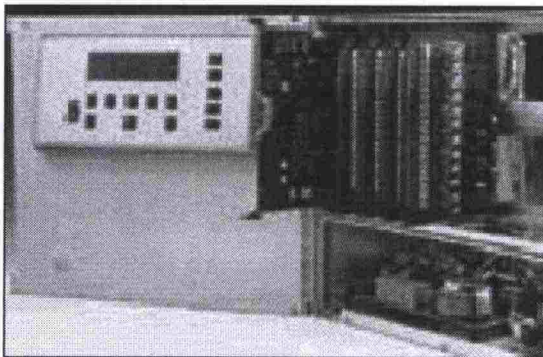
Pääväylän vihreän aloitus toteutetaan yleensä kiinteällä pyynnöllä. Jos alkuhetki vaihtelee, vihreän aallon toteutus on mahdotonta. Samasta syystä vihreän maksimiajan laskenta aloitetaan vaiheen alusta. Sivusuuntien vihreän aloitustapa on yleensä oma pyyntö. Jotta sivusuunnan vihreä ei haittaa pääsuunnan vihreää aaltoa, tarvitaan vihreän aloituslupa. Se antaa opastimelle luvan tulla meneillään olevan kierron aikana vihreäksi pyynnön tapahduttua. Lupa on voimassa siihen asti kunnes valo muuttuu vihreäksi tai kunnes lupa poistetaan. Vihreän esto eli luvan poisto määrää kierrosta sen ajankohdan mihin mennessä opastinryhmän on viimeistään saatava pyyntö vaihtuakseen vihreäksi kierron aikana. Toiminnon avulla saadaan määritettyä milloin sivusuunnan vihreän pyyntö voidaan toteuttaa sotkematta pääsuunnan liikennettä. Myös pääsuunnalla käytetään vihreän aloituslupaa, sillä edellisessä liittymässä ei voi antaa aloituslupaa liian aikaisin verrattuna seuraavan liittymän vihreän alkuhetkeen. Tämä koskee lähinnä pääsuunnalle kääntyneitä ja mitoitusnopeutta lujempaa kulkeneita ajoneuvoja. (Tiehallinto 1996.)

Valo-ohjauksen yhteenkytkennässä voidaan vaihdella vihreän ajallisen kestoa, tosin se on huomattavasti erilliskytkentää rajallisempaa. Vihreän aallon takareunalle voidaan antaa noin 5–15 sekunnin säätövara, jos ilmaisin on sijoitettu riittävän etäälle liittymästä. Vihreän aallon ratkaisussa voidaan käyttää myös muuttuvaa vihreän alkua erityisesti silloin, kun seuraavassa liittymässä on vihreän ennakko aika. Säätövaraa ei voi käyttää, jos liittymässä ei ole ilmaisimia. Tällöin käytetään aikaohjausta, ja vihreän aallon leveys on vakio. Yhteenkytkennässä jokaisella opastinryhmällä on käytössä jonon pur-

kutoiminto ja niissä liittymissä, joissa on ilmaisimet, käytetään myös valinta-alueen tyhjennystoimintoa. (Tiehallinto 1996, Luttinen 1994.)

2.6. EC-1 ohjauskojeen toiminta

Kehitettyssä simulointijärjestelmässä oleva kokesimulaattori toteuttaa EC-1 (Euro Controller) ohjauskojeen toimintaa. Koje on suunniteltu toimimaan eurooppalaisissa liikennejärjestelmissä. Se toteuttaa kaikki nykyiset erillis- ja yhteenkytkentäohjaustavat. Koje sijaitsee fyysisesti kojekaapissa, joka on sijoitettu maastoon ohjattavan liittymän läheisyyteen. Kojeen toiminta perustuu mikroprosessoriin, joka on mikropiirillä oleva tietokoneen prosessori. Halutut toiminnot ohjelmoidaan EC-1 kojeeseen parametrien avulla. Usein muutettavia parametreja, jotka eivät ole kojeen toiminnan kannalta kriittisiä, voidaan muuttaa kojeen valikon avulla. Muiden parametrien muuttamiseen tarvitaan ohjelmointiohjelmisto. (Verkossa 2003, Peek Traffic Oy 2002.)



Kuva 12. EC-1 ohjauskoje (Peek Traffic 2003.)

EC-1 kojeen edellinen versio on ELC, joka on yksi yleisimmin käytetyistä risteyskoje-typpeistä Suomessa. Myös järjestelmän tapaustutkimukseen valitulla testialueella valo-ohjauksen toteuttavat ELC-kojeet. Peek Trafficilla työskentelevän osastopäällikön Kari Ahon mukaan kojeiden parametrit eivät eroa toisistaan. Käytännössä kojeiden toiminta eroaa vain parametrien syöttövaiheessa. Parametrit tallennetaan erilaisiin tiedostoihin, joita ei voi käyttää kuin omantyyppisen kojeen ohjauksessa.

EC-1 kojeen opastinryhmäohjauksen parametrit voidaan jakaa kahteen osaan – perustoiminta- ja hallintaparametrit. Suurin osa parametreista käsittelee ohjauksen perustoimintaa opastinryhmä- ja ilmaisilogiikan avulla. EC-1 -kojeet on mahdollista jakaa alueisiin. Pääkoje ohjaa yhtä aluetta ja sen hallintaparametrit toteuttavat alueen yhteenkytkettyä valo-ohjausta. Nämä parametrit hallitsevat perustoimintaparametrien toteutusta. Esimerkiksi yhteenkytkennässä hallintaparametrien avulla voidaan toteuttaa alueen opastinryhmien vihreä aika niin, että se toteuttaa vihreän aallon. Jos yhteenkyt-

ketyttyjen kojeiden välinen tietoliikenne katkeaa, kojeet toteuttavat perusparametrien mukaista erillisohjausta.

Käytännössä ohjauskojeen toiminta ohjelmoidaan antamalla yksittäisille parametreille arvot, joita toteuttamalla ohjauskoje toimii halutulla tavalla. Ohjelmoinnissa ei tarvitse käyttää kaikkia kojeen parametreja. Käyttämättömille parametreille jätetään oletusarvo, joka on yleensä nolla. Ohjelmoitaessa on hallittava yksittäisistä parametreista muodostuva kokonaisuus. Kun parametreille on annettu arvot, ohjelman toimivuutta voidaan tarkastella toteuttamalla ohjaus maksimijaoilla. Ohjelmointiin tarkoitettussa ohjelmistossa on kokesimulaattori, joka toteuttaa valo-ohjausohjelman maksimijaoilla ja piirtää opastinkuvien tilat janoina ajan suhteen.

Opastinryhmä- ja ilmaisilogiikkaan liittyvien parametrien lisäksi ohjelmointiin liittyvät parametrit, jotka havaitsevat ilmaisinviat. Kojeen ei tarvitse olla liikenneohjattu, vaan ohjauksessa voidaan käyttää liikennetilanteen mukaisia ohjelmia. Parametrien avulla kojeeseen voidaan ohjelmoida aikatauluja, joissa on useita aikamäärittelyjä, milloin koje vaihtaa ohjelmaa tai liikennetilannetta. EC-1 kojeessa liikennetilanteella tarkoitetaan eri vuorokauden aikoina toteutuvaa tyypillistä liikennemäärää ja ajokäyttäytymistä kuten ajoneuvojen keskinopeutta. Erikoistilanteissa kuten hälytysajoneuvojen kulkiessa tai liikenneonnettomuuden sattuessa voidaan käyttää EC-1 kojeessa olevaa reittiohjausta. Sen tarkoituksena on suunnata liikenne vaihtoehtoisille reiteille häiriötilanteen uhatessa ja siten vähentää mahdollisen häiriötilanteen vaikutusta alueen liikennesujuvuuteen. (Peek Traffic Oy 2002, Liikennekeskus 2003.)

Valo-ohjauksen tilatietoja nähdään kojeessa olevan ohjauspaneelin näyttöruudulta. Näytöllä olevat LED-valot osoittavat opastinryhmien tilat. Valoja on kolmessa rivissä, joista ylin osoittaa punaista valoa ja alin vihreää. Jokaisella opastinryhmällä on oma valopino. Se valo palaa, joka näytetään kyseisen opastinryhmän opastinkuvassa. Ohjauspaneeliin saadaan näkymään myös tarkemmin opastinryhmien tilat. Jos halutaan tietää miksi ohjausryhmällä palaa kyseinen valo, käytetään GRINT-komentoa. Sillä näkyvät opastinryhmien logiikoiden tilat. Näytettävät tilamerkit on esitelty taulukossa 2. Jokaisella opastinryhmällä näkyy oma tilamerkinsä ja ne ovat kuvaruudulla vierekkäin järjestyksessä. DINT-komennolla näytetään ilmaisimien tilat. Yksi merkki näyttää yhden ilmaisinkanavan tilan. Plusmerkki tarkoittaa kyseisen ilmaisimen olevan varattu. Miinusmerkkiä näytetään, kun ilmaisim on vapaa. (Peek Traffic Oy 2002)

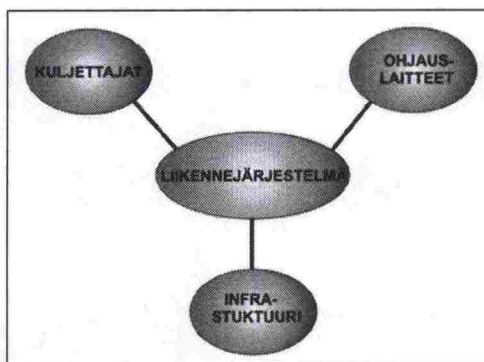
Taulukko 2. Opastiryhmien tilat ja niitä vastaavat merkit. (Peek Traffic Oy 2002.)

ASCII merkki	Tila Selostus
0	puna-keltainen
1	minimivihreä
2	ei käytössä
3	muuttuva minimivihreä
4	lepovihreä
5	vihreän pidennys
6	ei käytössä
7	lopetusviive
8	liikenneohjattu lopetusviive
9	synkronointi (odottaa muita ryhmiä)
:	vihreä vilkku
;	ei käytössä
<	kiinteä keltainen
=	keltainen (pimeä ulostulo)
>	liikenneohjattu keltainen
?	liikenneohjattu minimipunainen
@	punainen tyhjennysaika
A	minimi punainen
B	lepopunainen
C	punainen pyynnöllä
D	punaisella konfliktiryhmän etuisuuden takia
E	etuisuusaika
F	odottaa konfliktiryhmien vaihtumista punaiselle
G	lopettaa konfliktiryhmien vihreän
H	suoja- tai aloitusviive aika
I	kiinteä keltainen käynnistyessä
J	kiinteä punainen käynnistyessä

3. LIIKENTEEN MIKROSIMULOINTI

3.1. Simuloinnin perusteet

Liikenteen ohjauksella pyritään parantamaan muun muassa liikenteen kasvusta aiheutuvia liikenneturvallisuus- ja sujuvuusongelmia. Ohjausmenetelmiä on monia, joten sopivan menetelmän löytäminen tutkittavan alueen liikenteelle voi tuottaa suunnittelussa hankaluuksia. Ratkaisuksi on kehitetty apuvälineitä, joilla voidaan vertailla eri ohjaustapojen toimivuutta erilaisissa liikennetilanteissa aiheuttamatta alueelle todellisia seurauksia. Liikenteen mallintamisessa pyritään jäljittelemään liikenneprosessia, jossa vaikuttavat kuljettajien lisäksi ohjauslaitteet ja pysyvä liikenneympäristö eli infrastruktuuri (Kuva 13). Mallinnusohjelmien avulla verrataan eri skenaarioita, joita ei vielä ole olemassa, ja saadaan vertailuun tarvittavat tulokset vähin kustannuksin ja nopeasti. (Kosonen 1996, Kosonen 1999, Kosonen 2003c.)



Kuva 13. Liikennejärjestelmän ensisijaiset osatekijät. (Kosonen 1999.)

Simulointi on eräs liikenteen mallinnustapa. Simuloinnissa malli koostuu liikenteen eri osista ja niiden vuorovaikutuksista. Sen tarkoituksena on kuvata liikenteen toimintaperiaatteet mahdollisimman todentuntuisesti. Hyvä simulointimalli kuvaa riittävällä tarkkuudella ja tarkoituksenmukaisella tavalla tutkittavaa ilmiötä, sillä tulosten todenmukaisuus riippuu mallista ja sen tarkkuudesta. Malli on kuitenkin aina yksinkertaistus todellisuudesta, mikä on otettava huomioon analysoitaessa simuloinnin tuloksia. Tämän vuoksi simulointituloksia ei voi koskaan pitää todellisina, vaikka käytetyt syötetiedot olisivat tarkka kuvaus mallinnettavasta alueesta. (Kosonen 2003c, Luttinen 2002.)

Huonon mallin syynä ovat muun muassa sen epätarkkuus ja lähtötietojen puutteet. Syötettävien alkutietojen heikko vastaavuus todelliseen liikennetilanteeseen aiheuttaa epätarkkuutta. Tällöin tulos voi olla syntaktisesti oikein eli simulointiohjelmisto toteuttaa yleisesti oikealla tavalla liikennetilanteen kuvausta, mutta kyseinen malli on semantti-

sesti väärin, sillä se ei kuvaa tutkittavaa liikennettä todenmukaisesti. Simulointitulosten semanttisen virheen voi aiheuttaa esimerkiksi vanhentuneet tiedot, jotka eivät vastaa nykyistä liikennetilannetta. Tulosten luotettavuuteen vaikuttaa myös mallissa olevat syötetietojen puutteet, joiden syynä voi olla liikennetilanteeseen vaikuttavien tekijöiden vaikea mallinnettavuus esimerkiksi moninaisen riippuvuussuhteen takia. Tästä hyvä esimerkki on ajoneuvojen aikavälit, joihin vaikuttavat kuljettajan yksilölliset ajotavat, sää ja ajoneuvon nopeus sekä muita tekijöitä, joita on mahdoton mallissa esittää. Luttisen (2002) mukaan mallinnuksen ja syötetietojen virheiden lisäksi tulosten epätarkkuus voi johtua tietokoneen laskennallisista virheistä tai inhimillisistä virheistä. Tietokonevirhe voi syntyä, jos ohjelmisto ei seuraa tarkasti tarvittavaa matemaattista mallia tai käyttää algoritmia epätasaisesti. Inhimillisen virheen aiheuttaa käyttäjä, joka ei tarkkaan tiedä käytettävää menetelmää tai tekee huolimattomuusvirheen.

Simuloinnin lisäksi on olemassa myös muita liikenteen mallinnusohjelmia kuten sijoittelumalli Emme/2 ja kapasiteetin laskentamalli Capcal. Simuloinnin ero muihin mallinnusohjelmiin on stokastinen vaihtelu. Simulointi perustuu vähintään osittain satunnaisesti valittavan arvon valintaan (kts. kappale 1.4). Liikenteen simuloinnissa on aina myös aikaulottuvuus. Aikaa mitataan järjestelmän sisäisellä kellolla, jonka ei tarvitse edetä reaaliajassa. Jos simulointi on kytketty laitteisiin, jotka toimivat tavallisen kellon perusteella, kellon on seurattava todellista aikaa. Muuten simulointi kannattaa ajaa nopeammin, jolloin tuloksia voidaan analysoida mahdollisimman pian. (Kosonen 1996.)

Simulointimalliin tarvitaan lähtötietoja, joten tutkimuksen alussa on kartoitettava mitä tietoja malli tarvitsee ja onko niitä mahdollisuus kerätä. Kun tutkimuksen tavoitteet ja lähtötietojen saatavuus on selvillä, valitaan sopivin työkalu liikenneskenaarioiden mallintamiseen. Simulointimallinnustapa valitaan sen mukaan millä tarkkuudella ja mitä halutaan tutkia. Liikenteen simulointiohjelmia on hyvin eritasoisia, sillä tietokoneen rajallisen kapasiteetin vuoksi laajoja alueita ei voida tutkia hyvin yksityiskohtaisesti. Simulointimallien eri tasot mahdollistavat ohjelmiston ajamisen tavallisella mikrotietokoneella ja siten simulointiohjelmistoilla on laaja käyttäjäkunta. Laajojen alueiden kuvauksessa käytetään makrotasoisia simulointia, joka kuvaa liikennettä jatkuvina virtauksina. Mesoskooppisen tason mallissa voidaan kuvata myös yksittäisiä ajoneuvoja, mutta siinä ei ole yksittäisiä vuorovaikutuksia. Vielä yksityiskohtaisempaan tarkasteluun on kehitelty mikrosimulointi, jossa jokainen ajoneuvo ja sen vuorovaikutukset on kuvattu erikseen. Mikrosimuloinnilla tutkitaan pieniä alueellisia liikennetilanteita kuten muutaman valo-ohjatun liittymän toimintaa tai moottoritien lyhyttä jaksoa. Jos halutaan mallintaa vielä tarkemmin, esimerkiksi kuljettajan käyttäytymistä, käytetään nanoskooppista simulointimallia. (Kosonen 2003c, Kosonen 1996.)

Liikenteen simuloimisella on useita hyviä puolia verrattuna oikean liikenteen testaamiseen. Mallinnuksen tulokset on mahdollista saada edullisemmin kuin mittaamalla todellista liikennetilannetta. Tietokoneella voidaan korvata osa mittaamisessa käytetystä ihmistyöpanoksesta, sillä kone hoitaa tuloksiin tarvittavien tietojen mittaamisen automaattisesti ja tulostaa ne digitaalisesti käsiteltävään muotoon. Simuloinnin avulla säästytään myös turhilta laitehankinnoilta, kun laitteen sopivuus voidaan tarkistaa simulointimallilla ennen laitteen hankintaa. Taloudellisten seikkojen lisäksi simuloinnin etuna on sen nopeus ja käytännöllisyys. Simulointikokeita voidaan tehdä suuri määrä lyhyessä ajassa, jolloin saadaan runsaasti keskenään vertailukelpoisia tunnuslukuja. Simulointimallissa tutkimusasetelma on hyvin hallittavissa. Esimerkiksi liikennemääriä voidaan muuttaa vapaasti. Simulointi ei myöskään aiheuta häiriöitä liikenteelle tutkimuksen aikana. Ohjelmalla voidaan testata erilaisia menetelmiä ja niiden vaikutuksia ympäristöön välittämättä seuraamuksista. Joissain tilanteissa liikenteen mallintaminen on ainoa tutkimusvaihtoehto, sillä todellisen liikennetilanteen analysointi tutkittavan liikenneskenärian aikana voi olla mahdotonta. Käytännöllisyyteen liittyy myös simulointimallinnuksen graafinen käyttöliittymä. Tavallisten asukkaiden ja päättäjien kannalta simuloinnin tuottama animaatioesitys helpottaa ymmärtämään monimutkaisia liikennejärjestelmiä ja auttaa mahdollisesti tekemään oikeita suunnitteluratkaisuja. (Kosonen 2003c.)

3.2. Mikrosimulointi

3.2.1. Käyttötarkoitus ja toimintaperiaatteet

Mikrotason simuloinnissa dynamiikka syntyy suuresta määrästä vuorovaikutuksia, joten laajan alueen mallinnus ei ole mahdollista tietokoneen rajallisen laskentakapasiteetin vuoksi. Malli koostuu pienemmistä osamalleista, jotka mallintavat muun muassa ajoneuvon liikettä, liikenteen ohjausta ja reitin valintaa. Käytännön esimerkkejä osamalleista ovat nopeuden valinta, ajoneuvojen seuranta, kaistan vaihto, liikenteen ohjaus ja reittien valinta. Osamalleja on helpompi muodostaa ja hallita. (Kosonen 2003c.)

Nopeuden valintamallit ja ajoneuvon seurantamallit perustuvat joko sääntöihin tai erilaisiin matemaattisiin malleihin. Kaistanvaihtomallilla kuvataan eri nopeuksilla liikkuvien ajoneuvojen keskinäisiä ohituksia. Liikenteen simuloinnissa ajoneuvo ei voi ylittää samalla kaistalla olevaa toista ajoneuvoa, joten perässä tuleva ajoneuvo joko ohittaa hitaamman vaihtamalla kaistaa tai alentaa nopeutta niin, ettei peräänajoa tapahdu. Liikenteen ohjaus puolestaan mallinnetaan joko valo-ohjauksen avulla tai valo-ohjauksettomassa liittymässä aikavälien hyväksynnän ja väistämisvelvollisuuden perusteella. Ajoneuvojen reittien valinta mallinnetaan reitinvalintamallilla, joka voidaan to-

teuttaa muun muassa etukäteen määrätyn lähtö- ja määränpäämatriisin avulla. (Kosonen 2003c.)

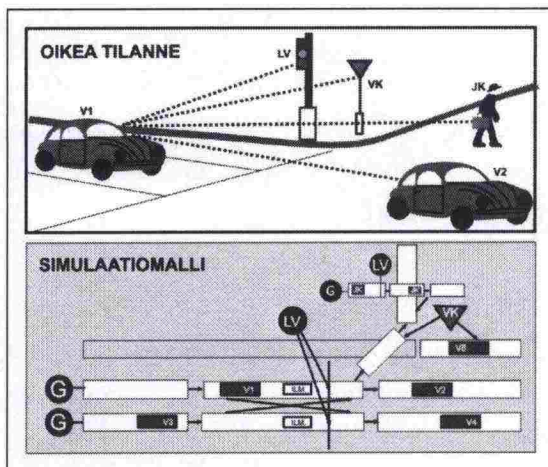
Tutkimuksessa on käytetty simulointiohjelmistoa nimeltään HUTSIM, joka on Teknillisen korkeakoulun liikennelaboratoriossa kehitetty mikrosimulointimalli. HUTSIM on tarkoitettu kaupunkimaisen liikenteen mallinnukseen. Se kehitettiin lähinnä valo-ohjauksisten liittymien toiminnan tarkasteluun, mutta sitä on sittemmin laajennettu myös moottoriteiden ja kaksikaistaisten teiden simulointiin. Ohjelmistoa ei ole tarkoitettu laajojen kokonaisuuksien kuten kokonaisen kaupungin mallintamiseen, vaan mikrosimulointitason mallina se soveltuu pienehkön mittakaavan simulointeihin. HUTSIM-ohjelmistolla tehdään lähinnä yksityiskohtaisia vuorovaikutustarkasteluja muutamassa liittymässä tai muutaman kilometrin pituisella moottoritiejaksolla. (Kosonen 1999, Kosonen 2003c.)

HUTSIM-simuloinnin peruseriaatteita ovat oliopohjainen mallinnus, sääntöpohjainen dynamiikka ja aikapohjainen päivitys (Kosonen 1996). Näiden periaatteiden avulla simulointi jäljittelee oikeaa liikennetilannetta mahdollisimman uskottavasti ja mallin toteuttaminen yksityiskohtaisesti on mahdollista tavallisella tietokoneella.

Oliopohjaisessa mallinnuksessa todellisen ilmiön mallintaminen voidaan pilkkoa pienempien kokonaisuuksien hallintaan (Kosonen 1999). Mallinnettavat kokonaisuudet yksilöidään ominaisuuksiensa ja toisiin olioihin muodostuvan vuorovaikutustensa avulla (Kosonen 1999). Esimerkkinä todellisen elämän oliosta on henkilöauto, jolla on tietyt ominaisuudet kuten paino, pituus, moottori jne. Henkilöautolla on tietynlainen vaikutus ympäristöönsä, mikä vaikuttaa esimerkiksi muiden liikennevälineiden liikkumiseen. Täten olion vuorovaikutus muihin olioihin on eräs sitä määrittelevä tekijä. Samanlaisia ominaisuuksia sisältävät oliot voivat muodostaa olioluokan. Esimerkkitapauksen henkilöauto voi muodostaa linja-auton ja kuorma-auton kanssa yhdessä olioluokan nimeltään moottoriajoneuvot. Niitä kaikkia yhdistää moottori. Moottoriajoneuvoilla on tietynlainen vuorovaikutussuhde esimerkiksi kevyen liikenteen olioluokkaan. Tarkastelutasosta riippuen oliopohjaisen ajattelumallin avulla voidaan kaikki todelliset käsitteet ryhmitellä eri olioiksi ja niiden välille asettaa vuorovaikutussuhteita. Oliomallien ansiosta konkreettiset järjestelmät voidaan mallintaa abstrakteina tieto-objekteina, joilla on samanlaisia vuorovaikutussuhteita kuin mallinnettavalla järjestelmällä. (Kosonen 1999).

Oliomallinnuksessa ohjelmiston päivittäminen on helppoa, sillä siinä voidaan päivittää yksittäinen kokonaisuus ilman koko ohjelman muuttamista. Jokaisella oliolla on rajapinta ympäristöönsä. Jos rajapinta pysyy muuttumattomana, voidaan olion ominaisuuksia parantaa yksilönä. Rajapintaa tarkastellaan yleisemmin kappaleessa 4.4.

Liikenne sisältää paljon erilaisia yksilöitä, joita on helppo kuvailla olioina. Niiden vuorovaikutussuhteet toisiinsa on merkittävä osa mallin tarkastelua. Käytännössä mallin on mahdoton toteuttaa kaikki todelliseen tilanteeseen vaikuttavat osatekijät, joten siihen on valittava tärkeimmät tilanteessa vaikuttavat tekijät. Mallinnuksen vaikeutena ei ole keksiä liikenteen erilaisia oliotyyppejä, vaan päättää mitkä yksilöt tarvitaan mukaan järjestelmän mallinnukseen. Samalla on määritettävä mukaan valittujen olioiden ominaisuudet sekä vuorovaikutussuhteet mallin muihin olioihin. Malliin valitun oliokokonaisuuden täytyy kuvata liikennejärjestelmän perusrakennetta, liikenneympäristöä ja liikenteen eri käyttäytymismalleja. Simulointimallin on kuvattava myös ajoneuvojen keskinäisiä vuorovaikutussuhteita, ajoneuvon ja valo-ohjauksen välisiä yhteyksiä sekä yksittäisen ajoneuvon ja liikenneympäristön välisiä vuorovaikutuksia. (Kuva 14.) (Kosonen 1996.)

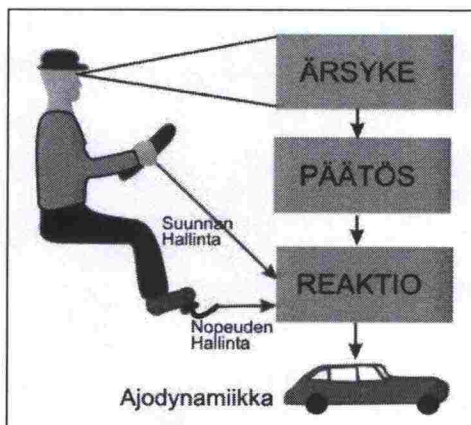


Kuva 14. Liikenneympäristön vuorovaikutus ajoneuvo-oliioon. (Kosonen 1996.)

HUTSIM-simulointiohjelmiston toinen toimintaperiaate on simuloinnin perustuminen sääntöpohjaiseen ajodynamiikkaan, jolloin jokaista liikkuvaa oliota hallitaan säännöillä (Kosonen 1996). Oliopohjainen mallinnus antaa hyvän perustan sääntöjen mukaiselle liikkeelle ja toisaalta sääntöjen avulla oliot käyttäytyvät mallissa johdonmukaisesti. Kun liikennemallin eri osat ovat itsenäisiä olioita, voidaan niille antaa yksilöllisiä sääntöjä. Sääntöjen noudattaminen mahdollistaa olioiden tarkoituksenmukaisen liikkeen ja estää liikkuvien olioiden yhteentörmäykset.

Simulaattorissa ajoneuvon liike perustuu kuljettajan päätöksenteon mallintamiseen. Todellisessa liikenteessä kuljettaja reagoi ärsykkeeseen joko vaihtamalla nopeutta tai ajosuuntaa. Tämän todellisen toiminnan pohjalta on kehitetty ärsyke ja reagointi -malli, jota toteutetaan liikenteen simuloinnissa. (Kuva 15.) HUTSIM-simuloinnissa korostetaan ajoneuvon nopeuden muutoksia ja yksinkertaistetaan kuljettajan reittipäätöksien

mallinnusta. Reititys simuloidaan yleensä siten, että ohjelma valitsee mallista päätepiirteen syötettyjen alkutietojen perusteella, minkä mukaan ajoneuvo valitsee reitin ja vaihtaa kaistaa tarvittaessa. HUTSIM-simulaatiossa ajoneuvo muuttaa nopeutta ärsykkeen takia tai saavuttaakseen tavoitenopeatensa. Jokaiselle ajoneuvo-oliolle annetaan liikennekäyttäytymisominaisuus eli ajoneuvokohtainen tavoitenopeus, jonka perusteella ajoneuvo voi vaihtaa nopeutta ilman toisen ajoneuvon tai ohjauksen ärsykettä. Tämä tarkoituksenmukainen nopeuden muutos voidaan sallia vain, jos toinen ajoneuvo tai liikenteen ohjaus ei ole rajoittamassa ajoneuvon nopeutta. (Kosonen 1996.)



Kuva 15. Malli ajokäyttäytymisestä (Kosonen 1996.)

Kuljettajan ennakointi tulevaa törmäysuhkaa vastaan on vaikea simuloida. Todelliset liikennetilanteet vaihtuvat nopeasti ja kuljettajan odotetaan pysyvän mukana jatkuvasti vaihtuvissa liikennetilanteissa ja olevan jopa hieman edellä oikeaa liikennetilannetta. HUTSIMissa todellisen liikkeen mallintaminen on toteutettu tarkkailemalla ajoneuvon nopeutta jatkuvasti. Koska itse ennakointi on vaikea mallintaa, ajoneuvo-olio laskee sääntöjen pohjalta jatkuvasti oman nopeutensa muutoksen mahdollisuutta. Ajoneuvon nopeutta muutetaan pienin yksikkömuunnoksiksi (2 km/h). Tämä estää nopeassa vauhdissa olevan ajoneuvon pysähtymästä liian nopeasti ja täten ajoneuvon liike toteuttaa fysiikan lakeja. Seuraavassa on esitetty taulukko, jossa sääntöpohjaisen ajodynamiikan mukaisesti ajoneuvo reagoi nopeuteensa edessä olevan ajoneuvon perusteella. Taulukon tarkoituksena on antaa jonkinlainen käsitys siitä, miten HUTSIM-ohjelmassa liikettä mallinnetaan eikä selvittää yksityiskohtaisesti miten se käytännössä toteutetaan. (Kosonen 1996.)

Taulukko 3. Nopeuden hallinnan sääntösarja (Kosonen 1996.)

1. *Ei nopeuden muutosta*
(Oletusarvo, pysyy voimassa ellei jokin muu sääntö astu voimaan)
2. *Lisää nopeutta*, jos $\{V_{oma} < V_{tav}\}$ ja $\{t-t_{viim} > T_{kiihd} * (V_{oma})\}$
(Lisätään nopeutta, jos nopeuden taso V_{oma} on tilapäisesti hidastunut tavoite nopeudesta V_{tav} . Kiihdytys hallitaan jälkimmäisellä ehdolla.)
3. *Älä lisää nopeutta*, jos $\{D_{este} < S_{min} * (V_{oma}, V_{este}) + L_{stab}(V_{oma}, V_{este})\}$
(Peruuttaa mahdollisen kiihdyttämisen, jos välimatka tulevaan esteeseen D_{este} on vähemmän kuin minimi turvaetäisyys S_{min} ja etäisyys, jota lähempänä ei saa kiihdyttää L_{stab} .)
4. *Hidasta*, jos $\{D_{este} < S_{min}(V_{oma}, V_{este})\}$
(Ajoneuvon on hidastettava jos etäisyys esteeseen D_{este} on vähemmän kuin minimi turvaetäisyys S_{min} , joka on oman ja esteen nopeuden funktio.)
5. *Älä hidasta*, jos $\{V_{oma} < V_{este}\}$ tai $\{t-t_{viim} < T_{maxhid}\}$
(Ajoneuvo ei hidasta nopeuttaan, jos edessä olevan esteen nopeus on suurempi tai jos edellisestä nopeusyksikön vähentämisestä on vähemmän aikaa kuin mitä maksimi hidastuvuus sallii)

Reitin mallinnuksessa lähtötietona annetaan jokaiselle syöttöpisteelle eli generaattorille määräpaikkajakauma, jossa on ajoneuvomäärien osuudet jokaiseen päätepisteeseen. HUTSIMissa ei mallinneta kuljettajan omia päätöksiä reitin suhteen lukuun ottamatta kuljettajan kaistanvaihto-ominaisuutta. Ajoneuvo-oliot liikkuvat putkissa, jotka esittävät kaistoja. Putken päässä on joko toinen putki tai päätepiste, jonka kautta ajoneuvot häviävät mallista. Putken päädyn lisäksi ajoneuvo voi vaihtaa myös toiselle putkelle, jos putken vierellä kulkee toinen samansuuntainen ja -pituinen putki. Tällöin mallissa ajoneuvo vaihtaa kaistaa. Sääntöjen mukaan oletusarvona ajoneuvo ajaa oikeanpuolen kaistaa, jos kaista ohjaa sinne minne ajoneuvo on menossa. Ajoneuvo vaihtaa kaistaa, kun se haluaa nopeuden hidastuessa ohittaa edellä olevan ajoneuvon, jos vasemmalla kaistalla on tarpeeksi tyhjää tilaa, eikä kaistanvaihto muuta ajoneuvon reittiä. Kun ohitus on tapahtunut, ajoneuvo palaa takaisin oikealle kaistalle. Säännöt estävät kaistanvaihdon, jos se tapahtuu liian usein tai sillä ei edistetä tavoitenopeutta. (Kosonen 1996.)

Muiden ajoneuvojen lisäksi myös liikenteen ohjaus vaikuttaa ajoneuvon nopeuteen, mutta liikenteen ohjauksella on erilainen vuorovaikutus ajoneuvon. Toinen ajoneuvo on aina este, kun se on näkyvässä, mutta liikenteen ohjauksella ei aina välttämättä ole estemäistä vaikutusta ajoneuvon. Esimerkiksi liikennevalojen vaikutus muuttuu esteestä vapaaseen kulkuun, kun valo vaihtuu punaisesta vihreälle. Tästä johtuen ohjaus tarvitsee omat sääntönsä ajoneuvon nopeuden muutoksiin. Liikenteen ohjauksen vaikutus ajoneuvon nopeuteen riippuu kuljettajan päätöksestä noudattaa ohjetta. Erityisesti vihreän päättyessä kuljettajan päätöksellä on merkitystä tulevan liikennetilanteen

muodostumiseen. Simuloinnissa valo-ohjaus lähettää jokaiselle lähestyvälle ajoneuville tiedon valojen tilasta. Lähetettävän signaalin lisäksi nopeuden muutokseen vaikuttavat ajoneuvon sijainti ja sen hetkinen nopeus. Valo-ohjauksen lähettäessä stop-viestin ajoneuvo ei muuta nopeuttaan, jos se ehtii pysäytysviivan yli ennen kuin opastinkuva muuttuu punaiseksi tai jos ajoneuvo on ongelma-alueella eikä ehdi pysähtymään pysäytysviivalle. (Kosonen 1996.)

HUTSIM-ohjelmiston kolmas toimintaperiaate on sen aikapohjainen päivitys. Simulointimallin avulla seurataan tarkasteltavan ilmiön muutoksia ajan funktiona. Muutos voi olla mikä tahansa tapahtuma, jossa järjestelmän tila muuttuu ja ohjelmaa on päivitettävä. Mitä tarkempi ja laajempi malli on, sitä enemmän tarvitaan päivityksiä. Todellisessa liikennetilanteessa voi tapahtua asioita yhtä aikaa. Tietokone pystyy tekemään vain yhden päivityksen kerrallaan. Todellisen tilanteen yhtäaikaiset tapahtumat toteutetaan simuloinnissa peräkkäin hyvin lyhyessä ajassa. Simuloinnin aikakäsite ja siihen liittyvä tapahtumien päivitys voidaan jakaa kahteen ryhmään. Toiset mallit päivittyvät jokaisen tapahtuman jälkeen, mitä kutsutaan tapahtumapohjaiseksi päivitykseksi. Toiset puolestaan päivittyvät tietyin aikaväleihin, mikä on nimeltään aikapohjainen päivitys. Riittävä päivitysten aikaväli on 0,1 sekuntia, jolloin tavallisen tietokoneen tehokkuus on riittävä ja liike näyttää jatkuvalta. Jos ajanjaksolla tapahtuu enemmän kuin yksi muutos, kannattaa käyttää aikapohjaista päivitystä. Muuten riittää tapahtumapohjainen päivitys. Mikrotason malleissa tapahtumia on yleensä niin paljon, että vaikka aikaväli on ihmisilmälle tarpeeksi lyhyt (0,1 sekuntia), ehtii ajanjaksolla tapahtua monta muutosta. Tästä syystä HUTSIM-ohjelmistossa käytetään aikapohjaista simulointia. Toinen syy aikapohjaiseen päivitykseen on sääntöpohjainen dynamiikka. Sitä ei voida käyttää liikkeen muutoksen määrittämisessä, jos simulointi päivitetään tapahtumapohjaisesti. Sääntöpohjainen dynamiikka määrittää sen hetkisen muutostarpeen, mutta tapahtumapohjaisessa päivityksessä lasketaan ajallisesti seuraavan muutoksen tarve. (Kosonen 1996.)

Kun simulointimallin toimintaperiaatteista päätetään, vaikutetaan tapaan, jonka mukaan ohjelmisto toteutetaan. Toimintaperiaatteet antavat yleiskuvan simuloinnin toiminnasta. Tässä työssä ei selvitetä tarkemmin HUTSIM-simuloinnin käytännöntoteutusta, sillä sitä kehitetään jatkuvasti eikä se ole oleellista tässä tutkimuksessa. Simulointijärjestelmän kehitystyössä on tiedettävä ohjelmiston toteutuksen periaatteet, mutta pienen kokonaisuuden lisääminen ohjelmaan ei vaadi koko järjestelmän yksityiskohtaista osaamista.

3.2.2. Syöttötiedot

Ennen liikennejärjestelmän simulointia ohjelmaan on rakennettava malli ja annettava tekstimuotoiset lähtötiedot. Simulointiohjelmilla on erilaisia tapoja toteuttaa mallin ja lähtötietojen editointiohjelma. Ohessa selvitetään HUTSIM-ohjelmistossa vaadittavat lähtötiedot. Vuonna 1996 julkaistu HUTSIMin ohjekirja selvittää yksityiskohtaisesti mitä alkutietoja tarvitaan mallin rakentamiseen ja tekstitiedostojen luomiseen (Sane, Kosonen 1996).

HUTSIMin malli tehdään HUTEDI-ohjelmalla, jonka muodostamaa tiedostoa (*.cnf) simulaattori käyttää liikenneverkon luomiseen. HUTEDI-ohjelmassa on graafinen käyttöliittymä. Mallilla kuvataan liikennejärjestelmän solmukohtat eli liittymät ja niitä yhdistävät putket eli tiet. Jokaiseen malliin tulee ainakin kaistoja kuvaavia putkia ja syöttö- ja pääteputkia. Ajoneuvoputkella on vähintään yksi liitos toiseen putkeen. Samanpituisia putkia voidaan asettaa rinnakkain samansuuntaisesti, jolloin kuvataan monikaistaista tietä. Peräkkäisten putkien väliset kulmat eivät vaikuta ajoneuvon liikennekäyttäytymiseen, vaan mutkien hidasteet on lisättävä erikseen. Syöttöpiste syöttää malliin ajoneuvoja, joille on määrätty mihin päätepuoleeseen ne suuntaavat. Saavuttuaan päätepuoleeseen ajoneuvo häviää mallista. Jokaisen liittymän haaraumalla on oltava yksi päätepuole ja vähintään yksi syöttöpiste. Poikkeuksen muodostavat yksisuuntaiset tiet, joissa ajoneuvo syötetään ainoastaan toisesta päästä ja poistetaan toisesta. Syötepuolesta luodessa voidaan samalla syöttää malliin kyseisen suunnan liikennemäärä sekä nopeus- ja suuntajakauma, mutta tiedot voidaan syöttää myös tekstitiedostojen avulla. Liikenne voidaan syöttää malliin sattumanvaraisesti (random generator) tai käyttää tekstitiedostoa, jossa on jokaisen malliin syötettävän ajoneuvon saapumisaika ja syötepuoleen tunnistenumero. (Sane, Kosonen 1996, Kosonen 2003c.)

Pakollisten osien lisäksi mallissa voi olla liikenteen valo-ohjausta, muita liikennemerkkejä, suojateitä ja bussipysäkkejä. Kuten todellisessa liikennejärjestelmässä myös HUTSIM-mallissa liikenteen valo-ohjaus koostuu kahdesta tai kolmesta komponentista – opastimesta, kojeesta ja mahdollisesti ilmaisimista. Niiden toiminta simuloinnissa vastaa todellisten laitteiden toimintaa. Vastaavuus on jopa niin tarkka, että simulointiohjelman sisäinen koje voidaan korvata yhdistämällä ohjelmaan oikea valo-ohjauskoje. Varoituskolmio kertoo väistettävälle ajoneuvo-oliolle sopivan aikavälin, jonka aikana se voi liittyä päävirtaan. Suojatie puolestaan pakottaa ajoneuvoa väistämään mahdollisia jalankulkijoita. Liikenteelle asetettu nopeakäyttö rajoittaa ajoneuvoa käyttämästä taivaitenopeuttaan, jos se on nopeakäyttöä suurempi. (Sane, Kosonen 1996.)

Malliin lisättyjen objektien välille on muodostettava tarvittavat yhteydet, jotka mahdollistavat mallin eri olioiden väliset vuorovaikutussuhteet (Sane, Kosonen 1996). Esimerkiksi putki on liitettävä seuraavaan putkeen tai päätepisteeseen ja valo-ohjausjärjestelmän osat on yhdistettävä toisiinsa. Myös putkien ja ohjauslaitteistojen välille on muodostettava yhteys, jotta ajoneuvot saavat tarvittavan tiedon ohjauslaitteilta.

Suurin osa simuloinnin tarvitsemista alkutiedoista voidaan syöttää ohjelmaan joko käyttämällä HUTEDI-editoria tai tekstitiedostoa. Jokainen HUTSIM-simulointimalli tarvitsee tekstitiedostona vähintään aloitustiedoston (*.ini). Jos tiedostoa ei ole ohjelman käynnistyessä, käytetään ohjelmassa oletusasetuksena olevaa Hutsim.ini -tiedostoa. Aloitustiedostossa luetellaan muun muassa simuloinnissa käytettävät muut alkutietoja tuottavat tekstitiedostot sekä simuloinnin päätteeksi muodostuvat tulostiedostot. Tiedostossa määritetään simulointiajoa koskevia parametreja, kuten simuloinnin kesto ohjelman sisäisen kellon mukaan ja mitä mallin osia näytetään kuvaruudulla ohjelman simuloimissa. Simuloinnin tulosten kannalta merkittävät parametrit koskevat ajoneuvon liikettä. Tiedostoon syötetään eri vaihtoehtoja ajoneuvojen kiihtyvyyksille, pituuksille ja tyypeille sekä annetaan vaihtoehtoja eri tavoitenopeuksien ja aikavälijakaumien liikennemääräosuuksille. Aikaväli on kahden peräkkäisen ajoneuvon vastinpisteiden välinen aikaero näiden ohittaessa tietyn poikkileikkauksen. HUTSIMin aikavälijakaumassa ajoneuvot on jaettu lyhimmän hyväksytyn aikavälin mukaisiin ryhmiin. Ennen simuloinnin aloitusta valitaan sopivat parametrivaihtoehdot, jotka voidaan vertailun vuoksi vaihtaa seuraavalla simulointikierröksellä. (Sane, Kosonen 1996, Nokela ym. 1980.)

Aloitustiedoston parametrien arvot voidaan kerätä simuloitavan alueen todelliselta liikennepaikalta, mallintaa matemaattisen kaavan avulla tai ottaa kirjallisuudesta, jossa on tutkittu samantapaisen alueen liikennekäyttäytymistä. Yleensä mallinnettavan alueen liikennemäärä saadaan maastomittauksilla, mutta esimerkiksi ajoneuvojen aikavälijakauman kerääminen maastosta yleispätevien tulosten saamiseksi on hyvin hankalaa ja hidasta. HUTSIMilla simuloimiseen on kalibroitu Suomen olosuhteisiin sopivat aika- ja nopeusjakaumat erityyppisille tieympäristöille. Vaihtoehtoista voidaan valita sopivin jakauma mallinnettavaan liikennejärjestelmään.

Aikavälijakauma voidaan myös laskea maastomittauksista, jos halutaan tarkentaa HUTSIMin valmista aikavälijakaumaa. Ohessa esitetty laskentatapa on nimeltään empiirinen kertymäfunktio, jonka avulla voi laskea yleispätevä aikavälijakauma mitatuista aikaväleista eri liikennemäärillä tietyssä nopeusluokassa. Kuvaus on otettu Luttisen (1996) väitöskirjasta, jossa käsitellään ajoneuvojen aikavälien tilastollista analyysiä.

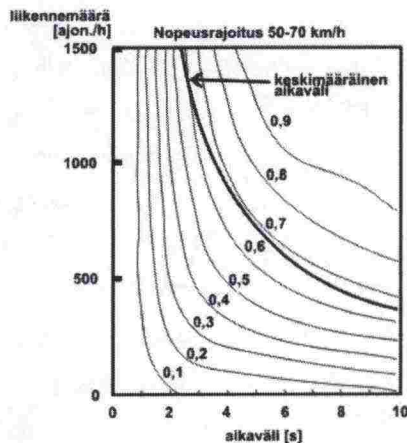
Kertymäfunktio tarkoittaa todennäköisyyttä sille, ettei aikaväli (T) ole suurempi kuin annettu arvo t .

$$F(t) = \Pr\{T \leq t\} \quad (10)$$

Olkoon aikavälihavaintojen otoskoko N ja havainnot asetettu suuruusjärjestykseen. Kertymäfunktio estimoidaan empiirisellä kertymäfunktioilla (*empirical distribution function*), joka antaa tulokseksi sen osuuden satunnaismuuttujista, joiden aikaväli on enintään t .

$$F_n(t) = \left\{ \frac{j}{N} \mid t_{(j-1)} < t \leq t_{(j)} \right\}, j = 1, \dots, n \quad (11)$$

Kaaviossa 11 $t_{(j)}$ tarkoittaa, että otoksessa on $j-1$ havaintoa, jotka ovat pienempiä kuin $t_{(j)}$. Matemaattisen mallin tuloksena saadut pisteet piirretään kuvaajaksi, joka muodostaa alueella käytettävien aikavälien yleiskuvauksen. (Kuva 16.) (Luttinen 1996.)



Kuva 16. Empiirisen aikavälifunktion avulla laskettu aikavälijakauma. (Luttinen 1996.)

Kuvaajan tulos ei ole luotettava pienillä liikennemäärillä, sillä mittauksissa saatiin vain muutama näyte liikennemäärän ollessa alle 200 ajoneuvoa tunnissa (Luttinen 1996). Kuvasta voi huomata, että alle sekunnin aikavälin hyväksyvien ajoneuvojen osuus liikennemäärästä on hyvin pieni. Empiirinen kertymäfunktio kasvaa jyrkästi aikavälillä 1–3 sekuntia. Taulukossa 4 on esitelty esimerkki simulointiohjelmistoon syötettävästä aikavälijakaumasta kuvaajan perusteella, jos simuloitava liikennemäärä on 1500 ajoneuvoa tunnissa.

Taulukko 4. Simuloinnin aikavälijakauma perustuen matemaattiseen kuvaajaan

Aikaväli [s]	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5
Osuus liikennemäärästä	0,1	0,15	0,15	0,2	0,1	0,1	0	0,2

Aloitustiedoston lisäksi HUTSIMissa on myös muita alkutietojen syöttämiseen käytettäviä tekstitiedostoja. Näiden avulla ilmoitetaan ohjelmistoon valo-ohjauksen ajoitus (*.sig), lähtöpaikka- ja määräpaikkamatriisi (*.trf), liikennetietojen muutokset (*.trf) ja yksittäisten ajoneuvojen saapuminen malliin (*.arr). Jos liikennemäärä pysyy simuloinnin aikana muuttumattomana, simulointi on mahdollista ajaa ilman liikennetietotekstitytiedostoa (*.trf). Tällöin käytetään HUTEDI-ohjelmaa ja syötetään lähtöpaikka- ja määräpaikkamatriisi sekä liikennemäärä jokaiseen syötepiisteeseen erikseen. Suuressa mallissa editorin käyttö liikennetiedon syöttämiseen on hidasta ja työlästä. Saapumistiedosto (*.arr) saadaan edellisen simulointiajon tuloksena. Sitä käytetään syöttötietona seuraavaan simulointiajoon silloin, kun halutaan kahteen ajoon täsmälleen samanlaiset liikennevirrat. HUTSIM hakee saapumistiedostosta järjestelmällisesti riveittäin sijaitsevat yksittäisten ajoneuvojen tiedot ja syöttää ne malliin oikeaan aikaan oikeasta syötepiisteestä. Valo-ohjauksissa liikennejärjestelmissä mallin jokaisella liittymäkohtaisella kojeella on oma tekstitytiedosto (*.sig), jossa ilmoitetaan ohjaus- ja ilmaisilogiikkaan tarvittavien parametrien arvot. Valo-ohjaustavasta riippuen opastimelle voidaan määrittää muun muassa minimi- ja maksimivihreä, keltaisen kesto, minimipunainen ja lepotilan tyyppi parametrit. Tiedostossa on myös taulukoitu vaiherinki ja ilmaisilogiikoiden määrä. (Sane, Kosonen 1996.)

3.2.3. Tulokset

HUTSIM-simuloinnin tulokset saadaan tekstitytiedostoina, joissa on yksityiskohtaisia tunnuslukuja muun muassa liikenteen sujuvuudesta ja ohjauksen toiminnasta. Yleensä HUTSMista saatuja tuloksia käytetään syöttötietona muihin mallinnusohjelmiin tai niitä voidaan analysoida ohjelmistolla, joka piirtää tuloksista kuvaajia. HUTSIMin versiossa 4.2 on kuusi erilaista tulostiedostotyyppiä. Ne ovat saapumistiedosto (*.arr), siirtotiedosto (*.exp), logitytiedosto (*.log), viivytystiedosto (*.del), liikennevirtatiedosto (*.flo) ja valo-ohjaustiedosto (*.grn). Kolme ensimmäistä tiedostoa on tarkoitettu lähinnä tietokoneohjelmille syöttötiedoiksi. Kolmen jälkimmäisen tiedoston tietoja voidaan myös käyttää suoraan liikennetilanteen analysoimiseen. (Sane, Kosonen 1996.)

Viivytystiedostossa on ajoneuvo-olioiden viivytys- ja pysähdystietoja. Siinä voi olla kaikki mallin ajoneuvot tai sitten voidaan määritellä alue, jolta tietoa halutaan kerätä. Jos mallissa on monta liittymää, viivytystiedot saadaan liikennetietoa keräävistä il-

maisimista. Analysointiohjelmilla tulokset voidaan lajitella esimerkiksi ajoneuvotyyppin, liittymän haaran tai reitin mukaan. Liikennevirtatiedostossa on kerätty tietoa yksittäisten ajoneuvojen nopeuksista ja aikaväleistä. Tiedostoa ei tarvita valo-ohjattujen liittymien tutkimuksissa. Valo-ohjaustiedostossa on kerätty tietoa valo-ohjauksen toiminnasta. Jokaisella opastinryhmällä on oma tiedostonsa, jossa kerrotaan riveittäin kerran sekunnissa opastimen tila. Valo-ohjaustiedoston lukemiseen on kehitetty oma SIGVIEW-ohjelma. Taulukossa 5 on lueteltu viivytys- liikennevirta- ja valo-ohjaustiedoston antamat tunnusluvut. Saatujen tunnuslukujen perusteella voidaan laskea muun muassa ajoneuvon matka-aika ja matkanopeus sekä valo-ohjauksisen liittymän kuormitusaste. (Sane, Kosonen 1996.)

Taulukko 5. HUTSIM-simulaattorin tulostiedostojen tunnusluvut (Sane, Kosonen 1996)

VIIVYTUSTIEDOSTO	LIIKENNEVIRTATIEDOSTO	VALO-OHJAUSTIEDOSTO
<ul style="list-style-type: none"> - viivytys [s] - pysähdysten määrä - kuljettu matka [m] - liikennevalon vihreän kesto[s] - liikennevalon kiertoaika [s] - maksimi jonon pituus [ajon.] - ajon. valinta-alueella vihreän päätyttyä [0/1] 	<ul style="list-style-type: none"> - aikaväli edellisestä ajoneuvosta [s] - nettoaikaväli edellisestä ajoneuvosta [s] - ajon. nopeus [km/h] - ajon. pituus [m] - ajoneuvotyyppi [1–10] 	<ul style="list-style-type: none"> - kiertoaika - lepoajan tyyppi [0–2] - nykyinen vaihe - opastimien tila

3.3. Ajantasainen liikennesimulointi

Liikennejärjestelmien tehostaminen kysynnän kasvaessa luo tarvetta parantaa liikenteen seuranta- ja hallintamenetelmiä sekä liikennetiedon saatavuutta yleisesti tienkäyttäjille (Kosonen, Bargiela 2000). Ajantasaisen liikennesimuloinnin avulla voidaan tehostaa liikenteen mallinnusjärjestelmiä ja tiedottaa liikkujille reaaliaikaisesti liikenteessä tapahtuneita muutoksia (Kosonen, Bargiela 2000). Liikenteen simuloinnilla pyritään kuvaamaan ja mittaamaan sen hetkistä liikennetilannetta mahdollisimman todentuntuisesti (Kosonen 2003b). Ajantasaisessa simuloinnissa syötetään ajantasaista liikennetietoa, joka saadaan mallinnettavalta alueelta sähköisesti tietoverkon avulla.

Pelkkä saapuvien ajoneuvojen liikennemäärä ajantasaisesti ei riitä identtiseen liikennekuvaukseen. Simuloinnin aikana oikeassa liikennetilanteessa saattaa tapahtua muutoksia, joita ei pystytä nykyisellä tekniikalla tunnistamaan ja lähettämään ohjelmistoon. Mahdollisuuksien mukaan liikennemäärän lisäksi malliin lähetetään todelliselta alueelta

esimerkiksi opastintietoa ja ajoneuvojen yksittäisiä ajonopeuksia. Ne lähtöarvot, joita ei saada ajantasaisesti, tuotetaan malliin lähtöarvojen avulla kuten tavallisessa liikennealueeseen kytkemättömässä simuloinnissa (Kosonen, Bargiela 2000). Johdettuja, ei-ajantasaisia lähtöarvoja, verrataan mahdollisuuksien mukaan ajantasaiseen tietoon (Kosonen, Bargiela 2000).

Oheisessa selvityksessä ajantasaisella simuloinnilla tarkoitetaan mikrosimulointimallia, joka on kytketty ajantasaiseen ilmaisintietoon. Mallinnettavan alueen ilmaisimet lähettävät tietoa silmukan varauksesta. Tieto analysoidaan simulointiohjelmassa ja malliin syötetään alueen todellinen ajoneuvojen määrä. Lähtöarvot, joita ei saada ilmaisimista, ovat peräisin alueen yleistuntemuksesta, liikenteen matemaattisesti kuvailtavista käyttäytymismalleista ja ajoneuvojen dynamiikan arvioinnista. Tavallisella simuloinnilla tarkoitetaan mallinnusta, jossa tietoa ei saada jatkuvalla syötteellä digitaalisesti muista järjestelmistä. (Kosonen, Bargiela 2000.)

Ajantasaisessa simuloinnissa tarvittavia lähtöarvoja on vähemmän kuin tavallisessa simulointimallissa (Kosonen, Bargiela 2000). Toisaalta tiedon kerääminen sähköisesti ja sen saaminen malliin mahdollisimman ajantasaisesti voi olla vaikeampaa kuin tiedon kerääminen manuaalisesti. Nykyisen tekniikan kehittyessä sähköinen tiedonkeruu kuitenkin helpottuu ja tiedon käyttäminen ajantasaisesti yleistyy.

Ajantasaisesti simuloitavan mallin rajat määräytyvät mallinnettavan alueen kauimmaisten ilmaisimien mukaan. Mallin syöttöpisteet sijoitetaan näiden ilmaisimien kohdalle. Mallinnettavan alueen reunalla sijaitseva ilmaisinsilmukka havaitsee yli menneen ajoneuvon ja lähettää ajoneuvosta tiedon simulointiohjelmistoon, jossa ajoneuvo syötetään malliin. Täten saadaan todellisempi liikenteen syöttömäärä kuin aikavälijakumaan perustuvalla ajoneuvojen generoinnilla. Silmukan on oltava kaistakohtainen, jotta tieto yksittäisistä ajoneuvoista on luotettava. (Kosonen, Bargiela 2000.)

Yhdestä silmukasta saatu tieto on sen varaus ja aika, jolloin viesti on lähetetty simulointiohjelmistoon. Ajantasaisen simuloinnin tulosten tarkkuus paranee huomattavasti, jos mallinnettavan alueen rajalla sijaitsevat ilmaisimet ovat kaksoissilmukoita. Silloin malliin saadaan reaaliaikaisesti liikennemäärän lisäksi muun muassa ajoneuvojen nopeudet ja tyypit. (Kosonen, Bargiela 2000.)

Mallinnettavan alueen sisäisten ilmaisintietojen avulla voidaan tarkistaa ajoneuvo-olion sijainti mallissa ajan suhteen. Tarvittaessa ajoneuvo-olion paikkaa voidaan siirtää poistamalla se nykyisestä paikasta ja lisäämällä se todellisessa liikennetilanteessa ilmaisun saaneen ilmaisimen kohdalle. Nykyisin ajoneuvo-olion reitinvalinta simuloidaan ajan-

tasaiseen malliin samalla tavalla kuin tavallisessa simulointiohjelmistossa eli kääntymisjakaumien perusteella. Reitinvalinta perustuu satunnaisuuteen, mikä tarkoittaa tuloksissa virheen mahdollisuutta. Vaikka liittymistä mitataan keskimääräiset kääntymisjakaumat ja syötetään ne malliin, liikenteelle ominaisen vaihtelun vuoksi mallin sisäinen liikennemäärä ei välttämättä vastaa todellista tilannetta. Jos simuloitaessa käytettäisiin ajantasaisen liikennemäärän lisäksi myös yksittäisen ajoneuvo-olion sijainnin tarkistusmenetelmää, saataisiin malli vastaamaan tarkemmin todellista liikennetilannetta. Tällöin mallia tulisi korjata lisäämällä ja poistamalla ajoneuvoja sisäisten ilmaisintietojen avulla. (Kosonen, Bargiela 2000.)

Mitä tiheämmin on saatavilla ilmaisintietoa, sitä tarkempi ja paremmin todellisuutta vastaava on simuloinnin lopputulos (Kosonen, Bargiela 2000). Toisaalta tiheän ilmaisiverkoston asentaminen ja ylläpito on kustannuksiltaan kallista. Infrastruktuuriin asennettavista laitteista saatava rajahyöty ajantasaiseen simulointiin kasvaa ensin merkittävästi, mutta alkaa vähetä optimaalisen järjestelyn jälkeen. Optimaalinen ilmaisinjärjestely riippuu muun muassa mallinnettavan alueen tyypillisestä liikennetilanteesta ja infrastruktuurista sekä simuloinnin käyttötarkoituksesta.

Liikenteen automaattisesta mittauspisteestä eli LAM-pisteestä saadaan yksittäisistä ajoneuvoista tietoa, joka voidaan hyödyntää ajantasaisessa simuloinnissa. LAM-pisteessä on kaksoissilmukka, jonka avulla saadaan mitattua liikennemäärän lisäksi myös ajoneuvon nopeus, pituus ja tyyppi. Mittauslaitteisto tallentaa myös tiedot ajoneuvon ohitusajasta, ajosuunnasta ja kaistasta. (Tiehallinto 2001b.)

Mallinnuksen kannalta LAM-pisteiden hyödyntäminen on hankalaa niiden harvan sijainnin ja vähäisen määrän takia. Mittauspisteen tietoja ei voida hyödyntää, jos se ei sijaitse mallinnettavalla tai edes samantyyppisellä alueella. Tiehallinnon (2001b) mukaan Suomessa on yhteensä noin 300 LAM-pistettä ja ne sijaitsevat yleisillä teillä vähintään muutaman kilometrin päässä toisistaan. Enimmillään välimatkaa eri pisteiden välillä on useita kymmeniä kilometrejä.

Yleisesti simulointimalli tulisi toteuttaa itseään säätäväksi siten, että sen tärkeimmät parametrit mukautuvat ilmaisintiedon mukaan. Tulevaisuudessa ilmaisimien lisäksi liikennetietoa tuottavat mahdollisesti myös GPS- ja kehittyneet videolaitteet, jotka pystyvät seuraamaan yksittäisiä ajoneuvoja. Tämä helpottaa entisestään simulointiparametrien mukauttamista todelliseen liikennetilanteeseen. (Kosonen, Bargiela 2000.)

4. DIGITAALISTEN JÄRJESTELMIEN KESKINÄINEN TIEDONVÄLITYS

4.1. Tiedonsiirron perusteet

Tietoliikenteellä (*telecommunication*) tarkoitetaan informaation siirtämistä tietoverkon (*network*) avulla. Verkko koostuu linkeistä eli siirtojohdoista ja niiden solmupisteistä. Solmupisteet toimivat informaation reitityspisteinä ja ohjaavat lähetetyn informaation oikeaan kohteeseen. Solmupisteet muodostuvat valitun verkkoteknologian mukaan kytkimistä tai reitittimistä tai niiden kombinaatiosta. Kuljetettava informaatio voi olla analogista tai digitaalista. Yleensä verkko suunnitellaan kuljetettavan informaatiomuodon sekä käyttötarpeen, kuvan, äänen tai datan mukaan. Verkon olennaisin tehtävä on välittää tietoa lähettäjän ja vastaanottajan välillä. Tietoverkossa lähettäjällä ja vastaanottajalla tarkoitetaan päätelaitetta, joka on yhdistetty tietoverkkoon. Päätelaitteita ovat esimerkiksi puhelin ja tietokone. Oheisessa selvityksessä on keskitytty pakettikytkentäisen verkon kuvaukseen. Siinä binäärimuotoiset paketit lähetetään yhteydettömästi verkon välittäjältä toiselle. Verkon päätelaitteina ovat tietokoneet. (Leon-Garcia, Widjaja 2003.)

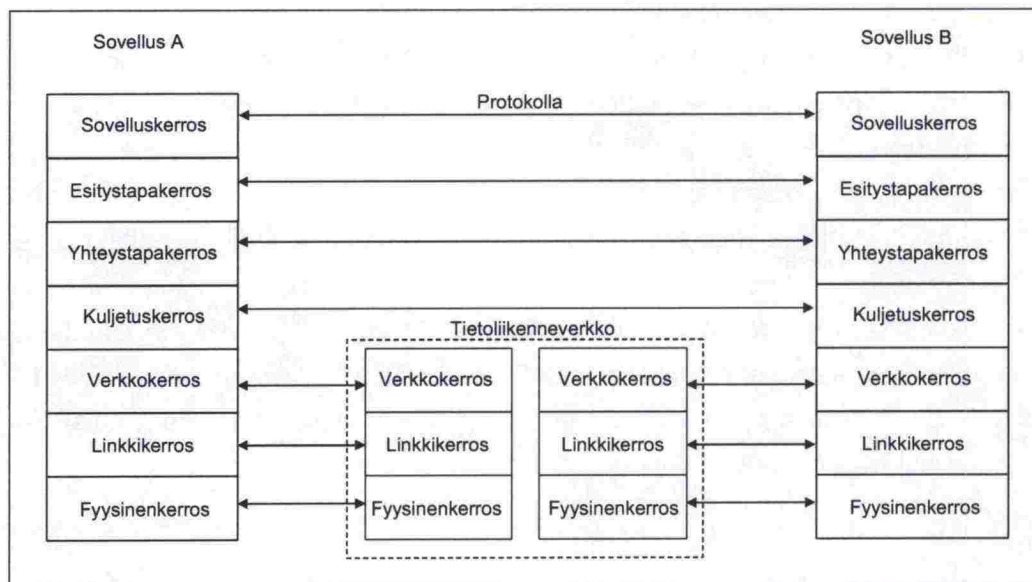
Tiedonsiirtoverkkojen laajeneminen yhdessä tavallisen liikenneverkon kanssa vaikuttavat liike-elämän kasvuun ja yhteiskunnan hyvinvointiin (Leon-Garcia, Widjaja 2003). Tietoverkkojen käyttö nyky-yhteiskunnassa on yleistä ja tällä hetkellä sen asema vahvistuu ihmisten välisenä tiedonsiirtokanavana. Nopea tiedonsiirto luo mahdollisuuksia tuottaa paikasta riippumattomia palveluja ja tuotteita. Tiedonsiirtoverkkojen avulla pystytään keräämään maantieteellisesti laajalta alueelta suuria määriä tietoa erittäin nopeasti – lähes hetkessä (Leon-Garcia, Widjaja 2003). Nämä kaksi ainutlaatuista tietoverkon ominaisuutta, siirtonopeus ja suuri tiedon siirrettävyys, ovat perusta monelle nykyisille ja tulevaisuudessa kehitettävälle palveluille (Leon-Garcia, Widjaja 2003). Myös tämän työn toteutuksessa käytetään tietoverkkoja ja siksi ohessa on selvitetty miten tietoverkko toimii käytännössä.

4.2. Tietoverkon OSI-malli

Tietoverkon kokonaisvaltainen arkkitehtuuri ja tarkka suunnittelu mahdollistavat verkon joustavan käytön. Tietoverkko suunnitellaan niin, että sillä on mahdollista tuottaa monia eri palveluita. Esimerkiksi maailmanlaajuisen yleisen tietoverkon, Internetin, välityksellä voidaan selailla sivustoja, lukea sähköposteja, keskustella reaaliaikaisesti sekä lähettää ja saada tiedostoja. Tietoverkon arkkitehtuuri voidaan esittää OSI-mallin (*Open System Interconnection*) avulla. Malli kehitettiin verkkojen yhteensopivuusongelmien

ratkaisuksi. Sitä käytetään lähinnä referenssimallina sen raskaan toteutuksen vuoksi, mutta se luo puitteet ymmärtää tiedonvälitysprosessi kokonaisvaltaisesti. Mallissa tiedonsiirto jaetaan toiminnallisiin kokonaisuuksiin, jotka esitetään eri kerroksina. Laitteiden välisten vertaisprosessien (*peer process*) viestiyhteydet kuvataan siinä kerroksessa, johon kyseinen prosessi kuuluu. Vertaisprosessi tarkoittaa kahden eri laitteen suorittamia toimintoja, jotka vastaavat toisiaan. Laitteiden keskinäinen tiedonvälitys hoidetaan protokollien avulla. Protokollat toteuttavat OSI-mallikerroksen sisäisen viestinvälityssäännösten ja siten mahdollistavat erilaisten laitteiden väliset viestiyhteydet kerroksen sisäisissä prosesseissa. Protokollan mukaisia laitteiden välisiä viestejä kutsutaan protokollatietoyksiköiksi, PDU (*protocol data unit*). Verkossa protokolla ilmenee joko yhden linkin pituisena tai koko verkon laajuisena päästä–päähän olevana viestiyhteytenä. Protokollan tarkoitus on tuottaa palveluita ylemmille kerroksille. Palvelut luovat yhteyden OSI-mallin kerrosten välille. Mallin ylempi kerros käyttää alemman kerroksen protokollien tuottamia palveluita. Alemman kerroksen toteutus on ylempää alkeellisempaa. (Leon-Garcia, Widjaja 2003.)

Kuvassa 17 on esitelty OSI-mallin kerrokset ja järjestelmien väliset yhteydet. Siinä sovellus A ja sovellus B sijaitsevat eri tietokoneissa ja niiden välillä on viestiyhteys.



Kuva 17. OSI-malli (Leon-Garcia, Widjaja 2003, Ala-Mutka ym. 2002)

Fyysinen kerros hoitaa bittien konkreettisen siirron siirtojohtoa pitkin. Siirtojohto voi olla esimerkiksi kuparia tai valokuitua. Verkkojärjestelmän parametreista jännitetaso ja merkinannon keston määrittely liittyvät fyysisen kerroksen toimintoihin. Fyysiseen kerrokseen kuuluvat laitteen asettaminen ja poistaminen verkosta sekä sokettityyppien ja pin-numeroiden hallinta. Soketti muodostaa sovellusohjelman ja muiden ohjelmien vä-

lille rajapinnan. Sen avulla ohjelmat voivat lähettää tietoa sovellusohjelmille ilman, että niiden on huolehdittava verkon yksityiskohdista. (Leon-Garcia, Widjaja 2003.)

Linkkikerroksessa tieto kapseloidaan kehykseen ja siirretään verkon solmulta toiselle. Linkkikerros sisällyttää kehykseen tiedon alku- ja loppupään. Kehykseen sisällytetään myös hallinta- ja osoitetiedot. Linkkikerros huolehtii kehyksen tarkistussumman avulla, ettei bittejä ole hävinnyt matkan aikana. Tieto voidaan kehystää useisiin kehyksiin riippuen bittien määrästä. Linkkikerros ei huolehdi missä järjestyksessä kehykset saapuvat vastaanottajalle. Mallin ylempien kerrosten protokollat tarvittaessa huolehtivat, että kehykset saapuvat vastaanottajalle oikeassa järjestyksessä. (Leon-Garcia, Widjaja 2003.)

Verkkokerros huolehtii tiedon siirtämisestä pakettimuodossa verkon yli. Tietoliikenteen kannalta kerroksen merkittävä tehtävä on reititys lähtökoneelta vastaanottavalle koneelle. Verkon solmujen on toimittava yhdessä, jotta toteutettu paketin reitti olisi mahdollisimman tehokas. Reitityksen käytännöntoteutus on esitetty tarkemmin kappaleessa 4.3. Reitityksen lisäksi verkkokerros hoitaa myös ruuhkanhallinnan, joka ilmenee ajoittain pakettien ajallisesti epätasaisen tiedonsiirron takia. (Leon-Garcia, Widjaja 2003.)

Kuljetuskerros hoitaa viestin kuljetuksen päästä päähän lähettäjältä vastaanottajalle. Kerros vastaa tiedon pilkkomisesta sopivan kokosiin segmentteihin, jotka ovat kerroksen protokollatietoyksiköitä (PDU). Se muodostaa tarvittaessa yhteyden lähettäjältä vastaanottajalle lähettämällä lyhyitä yhteysviestejä osapuolten kesken. Yhteysviestin avulla ilmoitetaan toiselle osapuolelle, että viesti on vastaanotettu. Yhteydellisen tiedonsiirron lisäksi kuljetuskerros voi toimia myös yhteydettömänä, jolloin yhteydenpidossa ei käytetä varmistusviestejä. Tällöin hukattuja segmenttejä ei lähetetä uudelleen. Yhteydellisessä tiedonsiirrossa kuljetetaan virheetöntä tavuvirtaa. Protokolla, joka tuottaa kyseistä palvelua, tunnistaa virheen ja varmistaa, että vastaanottaja saa ehyen tiedon. Yhteydettömässä tiedonsiirrossa tieto kuljetetaan erillisinä paketteina vastaanottajalle. Yhteys on epävarma ja paketit voivat kulkea eri reittejä vastaanottajalle. Kuljetuskerroksen protokollien käytännöntoteutus on esitetty tarkemmin kappaleessa 4.3. (Leon-Garcia, Widjaja 2003, Rintala 2001.)

Yhteystapakerros huolehtii sovellusten toimintojen koordinoinnista laitteiden välillä. Kerroksen avulla hallitaan menettelytapoja, joilla laitteet vaihtavat viestejä. Se hoitaa esimerkiksi lähetyksen käynnistämisen ja pysäyttämisen. Yhteystapakerros hoitaa myös tiedon lähettämisen oikeassa järjestyksessä. (Leon-Garcia, Widjaja 2003, Rintala 2001.)

Esitystapakerros tuottaa sovelluskerrokselle oikean muotoista esitystietoa, jolloin sovelluskerros on riippumaton sovelluksen A lähettämän tiedon esitysmuodosta. Esitystapa-

kerros muuttaa laitteen A sovellukselta saadun tiedon laite-riippumattomaan muotoon ja muuttaa sen lopuksi laitteen B sovelluksen ymmärtämään muotoon. Esimerkiksi viestin merkit on koodattu laitekohtaisesti eivätkä eri koneiden sovellukset osaa lukea toistensa merkkikoodia ilman muuntamistoimenpiteitä. (Leon-Garcia, Widjaja 2003)

Sovelluskerros tuottaa palveluita tietokoneen sovelluksille, jotka liittyvät tiedonvälitykseen. Esimerkiksi Internetissä selainsovellus käyttää sovelluskerroksen HTTP-protokollaa hakiessaan tarvittavaa WWW-dokumenttia sivustolle. Sovelluskerroksen tehtävänä on toimia rajapintana sovellukselle, joka tarvitsee viestiyhteyden verkossa. Selaimen lisäksi muun muassa sähköposti- ja tiedostonsiirto-ohjelmat käyttävät sovelluskerroksen tuottamia palveluita. (Leon-Garcia, Widjaja 2003, Ala-Mutka ym. 2002)

4.3. Pakettikytkentäinen tietoverkko

Kappaleessa esitetään pakettikytkentäisen verkon perusteet käyttäen Internetiä esimerkkinä. Internet perustuu TCP/IP tietoverkkoarkkitehtuuriin, jonka vastaavuus OSI-malliin on esitetty kuvassa 18. OSI-malli on liian raskas pinomalli toteutettavaksi käytännössä, mutta sen kerrosrakenneajattelua on sovellettu verkkojen arkkitehtuurissa. Siksi OSI-mallin ymmärtäminen on tärkeää selvitetessä tietoverkon perusteita. (Leon-Garcia Widjaja 2003, Rintala 2001.)



Kuva 18. OSI-mallin ja TCP/IP tietoverkkoarkkitehtuurin vastaavuudet. (Leon-Garcia, Widjaja 2003)

Pakettikytkentäisessä tietoverkossa ei tarvitse toteuttaa kaikkia TCP/IP-mallin kerroksia. Tietoverkkorajapinnan päällä on vähintään oltava sovelluskerros, joka toimii rajapintana laitteen sovelluksille. TCP/IP-mallissa tietoverkkorajapintaan on yhdistetty OSI-mallin fyysinen kerros, linkkikerros ja osa verkkokerroksesta. TCP/IP-mallin internetkerros

ros hoitaa pakettien kuljettamisen eri verkoista vastaanottajalle. Kuljetuskerros huolehtii kummassakin mallissa päästä-päähän toteutetun tiedonsiirron. TCP/IP-verkkoarkkitehtuurin sovelluskerrokseen on yhdistetty OSI-mallin kolme ylintä kerrosta. Verkon joustavuus perustuu mallin itsenäisesti toimiviin kerroksiin, mutta niiden välillä voi olla monimutkaisiakin rajapintoja, jotka vältetään yhdistämällä kerrokset toisiinsa. TCP/IP-verkkoarkkitehtuurissa on katsottu esitystapakerroksen ja yhteystapakerroksen toimintojen liittyvän kiinteästi sovelluskerroksen protokoliin, jolloin toimintoja ei ole järkevä erottaa toisistaan. (Leon-Garcia Widjaja 2003.)

Internetin suunnittelussa ei ole standardoitu tietoverkkorajapinnan fyysistä toteutusta yhteen mahdolliseen verkkotekniikkaan. Tässä työssä ei oteta kantaa kuinka fyysinen verkko voidaan tai kannattaa toteuttaa, vaan keskitytään enemmän internet- ja kuljetuskerroksiin. Internet muodostuu runkoverkosta (WAN), johon on yhdistetty lähiverkkoja (LAN). Lähiverkot on toteutettu yleensä broadcast-verkkoina, mikä tarkoittaa tiedon olevan kaikkien lähiverkossa olevien työasemien saatavilla. Ne yhdistetään toisiinsa runkoverkon ja siltojen avulla. Runkoverkko muodostaa linkkiyhteydet lähiverkkojen välille ja silta on eräänlainen lähiverkon rajapinta muuhun verkkoon. Lähiverkon silta välittää paketin lähiverkosta runkoverkkoon. Se tietää missä lähiverkon päätelaitteet sijaitsevat ja estää päättymättömien viestinlähetysrenkaiden (*loops*) muodostumisen. (Leon-Garcia Widjaja 2003, Niinimäki ym. 1999, Tepa 2003.)

TCP/IP -mallin internetkerros huolehtii pakettien reitittämisestä lähettäjältä vastaanottajalle. Lähiverkkojen sillat ovat osa verkon reitittimiä. Siltojen lisäksi verkossa on reitittimiä jokaisessa runkoverkon solmukohdassa. TCP/IP-mallin internetkerroksen tunnetuin protokolla on IP (*internet protocol*). Se mahdollistaa tiedonvälityksen laajassa ja eri tietoverkoista muodostuneessa kokonaisuudessa. Osaverkoilla voi olla käytössä eri verkkotekniikoita. IP-protokollan ansiosta jokainen päätelaite, joka on yhdistetty Internetiin, voi lähettää viestin toiselle Internetissä olevalle päätelaitteelle. (Leon-Garcia Widjaja 2003.)

Internetkerroksessa tieto kapseloidaan IP-paketiksi. IP-paketin otsikkokentässä on muun muassa lähettäjän ja vastaanottajan IP-osoite (Leon-Garcia Widjaja 2003). IP-osoite on Internetiin kytketyn tietokoneen yksilöivä numeerinen tunnus (Tepa 2003). Se on määritelty loogisesti verkkotopologian perusteella (Leon-Garcia Widjaja 2003). Nykyisen verkkojärjestelmän osoitteet muodostuvat 32 bitistä. Ne on jaoteltu neljään kenttään, joista jokainen muodostaa numerosarjan. Verkkotopologisesti osoite jaetaan verkko-osaan ja verkkokohtaiseen isäntäosaan. Osoitteessa oleva verkko-osuus ja isäntäosuus vaihtelevat verkon laajuuden mukaan. Jos verkko-osa on pieni, esimerkiksi vain ensimmäinen numerosarja, lähiverkko muodostuu isoksi ja siihen voidaan liittää

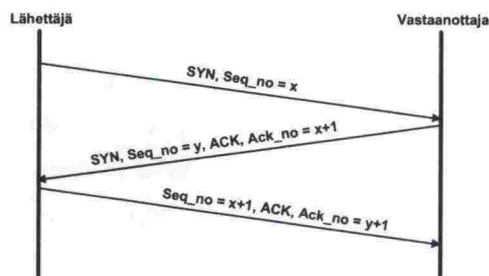
useita isäntäkoneita. Jos verkko-osoitteena on useita numerosarjoja, voidaan muodostaa enemmän lähiverkkoja kuin edellisessä esimerkissä, mutta yhdessä verkossa voi olla vähemmän isäntäkoneita. Lähiverkko voidaan jakaa osiin maskiosoitteen avulla. Maskiosoitteessa bitin arvolla yksi määrätään ne IP-osoitteen bitit, jotka on oltava identtiset samassa aliverkossa.

Jos paketin lähettäjä ja vastaanottaja sijaitsevat saman lähiverkon alueella, reititystä ei tarvita. Lähiverkon silta kysyy yhteisesti kaikilta päätelaitteilta kenellä on vastaanottajan IP-osoite ja lähettää paketin oikealle koneelle. Runkoverkon reitittimien tehtävänä on reitittää tietopaketti lähettäjältä vastaanottajalle mahdollisimman taloudellisesti. Se ei välttämättä merkitse lyhintä reittiä, vaikka pituus onkin eräs määräävistä tekijöistä. Myös linkkien siirtokapasiteetti, kysyntä ja eheys vaikuttavat reitin valintaan. Yhdelle reitittimelle voi tulla enemmän tietoliikennettä kuin se pystyy sitä välittämään edelleen. Tällöin viestit varastoidaan puskuriin. Jos puskuri on täynnä, viesti häviää eikä itse verkko ole ominaisuuksia huolehtia hävinneistä biteistä (Leon-Garcia Widjaja 2003). Tästä syystä pakettikytkentäisen verkon kuljetustapaa kutsutaan yhteydettömäksi. Internet-kerros tarjoaa best effort -palvelua, joka tarkoittaa, että tieto pyritään viemään perille, mutta perillepääsyä ei varmisteta. Verkko ei tiedä mitä se kuljettaa ja minne, vaan tieto kuljetetaan linkiltä toiselle päämääränä vastaanottajan osoite.

Jos paketin perille meno halutaan varmistaa, käytetään TCP/IP -mallin kuljetuskerroksen protokollaa nimeltään TCP (*Transmission Control Protocol*). Kuljetuskerros tarjoaa myös yhteydettömän protokollan nimeltään UDP (*User Datagram Protocol*). Kummatkin käyttävät IP-protokollan tuottamaa best effort -palvelua ja tuottavat sen päälle oman palvelun. Sovellusprotokollat käyttävät puolestaan TCP- tai UDP-protokollan tuottamaa palvelua tuottaessaan viestiyhteyden palvelulle.

UDP-protokolla tuottaa epäluotettavaa tiedonsiirtoa. Se on yksinkertainen protokolla, joka tuottaa vain kaksi lisäpalvelua verrattuna IP-protokollaan. Palvelut ovat multipleksaus (multiplexing) eli tiedonsiirtokanavan kuljetuskapasiteetin tehostaminen ja tietopaketin virheen tarkistus. IP-protokolla tarkistaa vain paketin otsikkokentän virheettömyyden. UDP-protokolla tarkistaa myös lähetettävän tiedon eheyden. Jos se huomaa tiedon menneen rikki eli bittien kadonneen, se hylkää viestin. UDP-protokolla ei lähetä kadotetusta viestistä tietoa kummallekaan osapuolelle. Se tunnistaa myös verkon sovellukset viestiyhteyden päädyissä, mitä IP-protokolla ei osaa tehdä. UDP-protokolla kuljettaa irrallisia datagrammeja (datagram). Tarvittaessa iso tietomäärä pilkotaan pienempiin osiin, joiden kuljetus vastaanottajalle tapahtuu toisistaan erillään. (Leon-Garcia Widjaja 2003.)

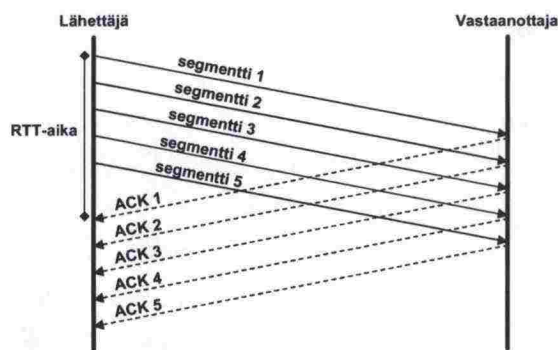
TCP-protokolla tuottaa luotettavan, kaksisuuntaisen, yhteydellisen yhteyden tavuvirralla IP-protokollan tuottaman palvelun päälle. Protokolla tuottaa, kuten UDP-protokolla, virheen tarkistuksen ja multipleksauksen. Näiden lisäksi se tuottaa tietovuon ohjausta, mikä tarkoittaa lähettäjän mahdollisuutta tarkkailla millä siirtonopeudella tietoa kannattaa lähettää, että lähetys menee perille. Jos lähetysnopeus on liian suuri, reitillä olevien linkkien tai vastaanottajan puskurit täyttyvät ja tieto häviää verkosta. Yhteydellinen ja luotettava siirtoyhteys aloitetaan tekemällä niin sanottu kolmivaiheinen kättely. Lähettäjän ensimmäinen viesti vastaanottajalle on SYN-viesti, joka osoittaa yhteyden avatuksi ja synkronoi osapuolten lähettämien viestien järjestysnumerot. TCP-yhteyden ensimmäinen lähetetty viesti jättää reitittimiin merkinnän ja jatkossa yhteyden aikana lähetetyt viestit kulkevat samaa tietoverkkopolkua pitkin. Tämän vuoksi käytetään käsitettä tavuvirta eikä irrallisia paketteja TCP-protokollan yhteydessä. Kun vastaanottaja saa lähettäjän SYN-viestin, se lähettää yhteyden avaamishyväksynnän, jonka lähettäjä ilmoittaa saaneensa ACK-viestillä (Acknowledgement Frame). (Kuva 19.) Kun kolmivaiheinen yhteydenavaus on onnistunut, lähettäjä aloittaa tiedon lähettämisen segmenteissä. (Leon-Garcia Widjaja 2003, Peuhkuri 2002.)



Kuva 19. TCP-protokollan mukainen viestiyhteyden avaaminen.

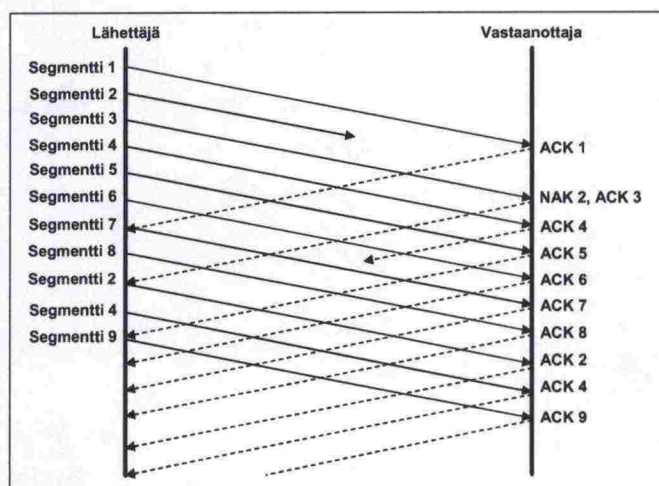
(Leon-Garcia Widjaja 2003)

TCP-protokollan mukaisessa viestiyhteydessä vastaanottaja lähettää jokaisen saamansa segmentin jälkeen ACK-viestin. Tiedonvälityksen siirtonopeus olisi liian hidasta, jos seuraava segmentti lähetettäisiin vasta, kun edellinen ACK-viesti on saapunut. Siksi segmenttejä lähetetään tiheämmin ja ACK-viestejä odotetaan tulevan viiveellä (Kuva 20).



Kuva 20. TCP-protokollan mukainen segmenttien lähetyks.

Viive on määritelty edestakaisen matka-ajan perusteella (*Round Trip Time*). Jos RTT-ajan jälkeen lähettäjä ei ole saanut ACK-viestiä, se lähettää segmentin uudelleen (Kuva 21). Segmenteilla on liukuva sekvenssinumero, jonka avulla vastaanottaja tarkistaa, etteivät paketit mene epäjärjestykseen. Myös ACK-viesti voi hukkua matkalle. Lähettäjä ei voi kuitenkaan tietää kumpi viesteistä on hävinnyt, joten se lähettää aina RTT-ajan jälkeen segmentin uudelleen. Vastaanottaja ei hyväksy uudelleen jo saatua pakettia, vaan hylkää sen ja lähettää siitä uuden ACK-viestin. Vastaanottaja voi päätellä sekvenssinumeron loogisesta etenemisestä, jos välistä puuttuu segmentti. Kun vastaanottajan saama segmentti ei vastaa järjestyksessä seuraavan segmentin sekvenssinumeroa, se lähettää NAK-viestin (*Negative Acknowledgement Frame*) (Kuva 21). Sillä se ilmoittaa, mikä segmentti on jäänyt välistä tulematta. Vastaanottajalla on puskuri, johon se varastoi paketit kunnes järjestys on oikea ja tieto voidaan edelleenvälittää sovellukselle. Samoin lähettäjäällä on puskuri, jossa se varastoi segmenttejä, joiden ACK-viestit eivät ole saapuneet. Kun sovellus ilmoittaa, ettei lähetettävää tietoa ole enempää, lähettäjä sulkee yhteyden FIN-viestillä, johon vastaanottaja vastaa ACK-viestillä. (Leon-Garcia Widjaja 2003.)



Kuva 21. TCP-protokollan mukainen luotettava viestiyhteys.

UDP-protokollaan verrattuna TCP lähettää huomattavasti enemmän viestejä. UDP-protokollan mukaisessa tiedonvälityksessä yhteyttä ei avata tai suljeta eikä vastaanottaja lähetä yhtään viestiä. Jos viestiyhteyden ei tarvitse olla luotettava, käytetään verkkoa vähemmän kuormittavaa ja nopeampaa UDP-protokollaa. Verkko itsessään ei ole älykäs, joten jos halutaan varmistaa tiedon perillemeno, on käytettävä TCP-protokollaa.

4.4. HUTSIMin rajapinnat

4.4.1. Määrittely

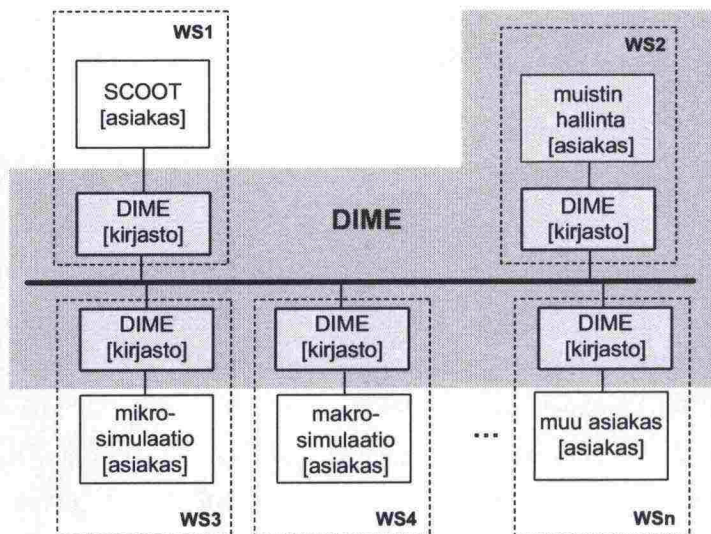
Rajapinta tarkoittaa järjestelmän liityntäkohtaa muihin järjestelmiin. Finnet-liiton telesanaston (1991) mukaan rajapinta on kahden laitteen, järjestelmän tai ohjelman, välinen yhtymäkohta ja sopimus yhteistoiminnan vaatimuksista. Jos rajapinta pysyy muuttumattomana, voidaan järjestelmänosaa muuttaa ilman, että se vaikuttaa järjestelmän luomaan kokonaisuuteen. OSI-mallin kerroksellinen toiminnallisuus perustuu tähän rajapinnan ominaisuuteen. Mallissa voidaan muuttaa esimerkiksi fyysistä kerrosta, jos sen rajapinta linkkikerrokseen pysyy samana. Samoin ohjelmistojen joustava kehittyminen tapahtuu rajapintojen avulla. Koko ohjelmiston päivittäminen voi olla raskas ja hidas prosessi, joten yleisesti ohjelmistoa kehitetään osissa. Ohjelmiston osaa voidaan kehittää muuttamatta koko ohjelmistoa, jos kehitetyn osan rajapinta pysyy ennallaan.

Järjestelmän osittaisen kehittämisen lisäksi rajapintoja voidaan käyttää myös eri järjestelmien yhdistämisessä. Kaksi irrallaan toteutettua järjestelmää voidaan yhdistää tekemällä niiden välille yhteinen rajapinta. Toteutuksessa rajapinta muuttaa järjestelmien lähettämät viestit niin, että vastaanottaja pystyy hyödyntämään vastaanotetun viestin. Rajapinnan tuomia kehittämismahdollisuuksia on käytetty hyväksi muutettaessa HUTSIM-ohjelmistoa työn tavoitteiden saavuttamiseksi.

4.4.2. HUTSIM ja SCOOT – ajantasainen simulointijärjestelmä

Ajantasaisen simuloinnin (kts. kappale 3.3) toimintaperiaatteita on tutkittu yhteistyössä Teknillisen korkeakoulun ja Nottinghamin Trent yliopiston kanssa. Prototyyppi perustui HUTSIM mikrosimulointiohjelmistoon, SCOOT valoohjausjärjestelmään sekä jaettuun muistitiedonvälityskehykseen nimeltään DIME (*distributed shared memory environment*). SCOOT valo-ohjausjärjestelmä tuottaa ajantasaista ilmais- ja opastintietoa sekä liikennemallin mittaustuloksia ja soveltuu siksi erinomaisesti ajantasaisesti toimiviin järjestelmiin. Prototyypin lähtökohtana on asiakas ja palvelin -arkki-tehtuuri. DIME-järjestelmä toimii palvelimena. Se muodostaa tietoliikenneyhteyden monenlaisten yksit-

täisten kokonaisuuksien välille sekä ylläpitää saatua aineistoa yhteismuistissaan. Palvelimen asiakkaina ovat järjestelmän muut toimijat kuten todellinen valo-ohjausjärjestelmä ja erilaiset simulointiohjelmistot (Kuva 22). Järjestelmän tietoliikenneyhteydet perustuvat TCP- ja IP-protokolliin, ja se on riippumaton käytetystä fyysisestä verkkotyypistä. (Kosonen, Bargiela 2000.)



Kuva 22. DIME ajantasaisessa simulointijärjestelmässä. (Bargiela 1997.)

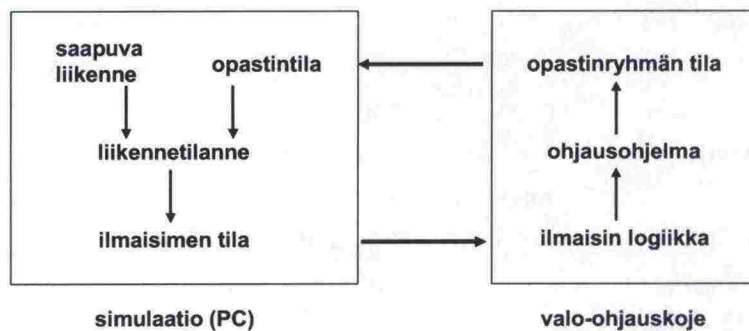
SCOOT lähettää ajantasaiselle simulointijärjestelmälle kahdentyyppisiä viestejä. Toinen viestityyppi sisältää mallinnettavan alueen ilmaisintietoa ja sen lähetysnopeus on 4 kertaa sekunnissa. Toisessa viestityypissä, lähetetään linkki- ja opastintietoa. Se lähetetään kerran sekunnissa. Viestit saapuvat DIMEn muistinhallintapuskuriin. Simulointiohjelmiston ja muistinhallinnan rajapinnassa on viestin tulkitsija. Se on järjestelmässä asiakas, joka muuntaa viestit simulointiohjelmistolle sopivaan muotoon. Muokattujen viestien perusteella simulointiohjelmisto syöttää malliin ajoneuvoja sekä tuottaa valo-ohjausta todellisen liikennetilanteen mukaisesti. Prototyypissä on SCOOTin, HUTSIMin ja tulkin lisäksi myös neljäs asiakas. Se laskee opastintilaviestien avulla mallinnettavan alueen kääntyvien ajoneuvojen osuudet ja syöttää viidentoista minuutin välein HUTSIMiin päivitetyn kääntymisjakauman. HUTSIM toimii käytännössä kuten tavallisestikin simuloitaessa. Ohjelmiston sisäisen kellon nopeudeksi on asetettava todellinen aika. HUTSIMiin on kehitetty uusi rajapinta, joka vastaanottaa tietyn formaatin mukaisia viestejä. Viestit sisältävät tietoa ajoneuvojen saapumisesta, liikennevalojen tiloista tai kääntymisjakaumista. Tietoliikenteessä aiheutuvista viiveistä johtuen, simulointi ei ole täsmälleen ajantasaista. Prototyypin viive oli vakio, tyypillisesti 5–15 sekuntia. (Kosonen, Bargiela 2000.)

Prototyyppi testattiin simuloimalla Mansfieldin keskustassa sijaitseva kuuden liittymän alue. Ruuhka aikoina alueen sujuvuus heikkeni merkittävästi. Mallinnettavan alueen rajoilla sijaitsevat ilmaisimet lähettivät simulointiohjelmistolle ajoneuvojen syöttötiedot. Alueella sijaitsevien muiden ilmaisimien avulla mitattiin liittymien kääntymisjakaumat. Simuloinnin tulokseksi saatiin liittyisiin muodostuvien ajoneuvojonojen pituudet valo-ohjauskierroksen aikana. Tuloksia verrattiin SCOOTin mittaamiin jonojen pituuksiin mallinnettavalla alueella. Vertailutulokset olivat yleisesti hyviä. Simuloinnin sisäistä liikennettä tulisi korjata kääntymisjakauksen lisäksi myös poistamalla ja lisäämällä ajoneuvo-olioita alueella sijaitsevien ilmaisimien niin osoittaessa. Täten voitaisiin välttää todellisesta liikennetilanteesta poikkeavan yksittäisen ajoneuvo-olion aiheuttama virheen kumuloituminen pitkän aikajakson aikana. (Kosonen, Bargiela 2000.)

4.4.3. HUTSIM ja todellinen koje – HUTSIM-ohjelmiston prototyyppi

HUTSIM-ohjelmiston ensimmäisessä versiossa mallin valo-ohjaus saatiin oikealta valo-ohjauskojeelta. Tällöin virtuaalista liikennetilannetta ohjasi oikea koje kuten todellisessa liikennetilanteessa. Todellisen kojeen käytön hyvä puoli oli simulointiohjelmiston pysyminen yksinkertaisena, mutta samalla mallinnukseen saatiin mahdollisimman aito valo-ohjaus. (Kosonen 1996.)

Käytännössä järjestelmä toteutettiin yhdistämällä oikea kojekaappi tietokoneeseen rajapinnan avulla. Rajapintana oli yksinkertainen PC-kortti, jossa oli useita rinnakkaisia I/O-portteja, ja virtapiiri, joka muunsi lähetettävien signaalien tasoja laitteiden välillä. Se toimi kaikilla kojetyypeillä. HUTSIM-simulointi tuotti kojeelle pyyntöjä liikennetilanteen mukaan ja koje tuotti liikennesimulointiin opastintilat ilmaisilogiikkansa avulla. (Kuva 23.) Simulointiohjelmistoon kytketty ohjauskoje sai rajapinnan kautta samankaltaisia ilmaisinpulsseja kuin todelliselta ilmaisimelta. Se reagoi niihin ohjelmointiensä mukaisesti ja lähetti opastimien tilat rajapinnalle kuten todelliselle opastinryhmälle. Signaalit kulkivat rajapinnan kautta tietokoneelle, jossa HUTSIM käsitteli viestit ja päivitti opastintilat. (Kosonen 1996.)



Kuva 23. HUTSIM-simulointiohjelmiston ja valo-ohjauskojeen yhteys. (Kosonen 1996.)

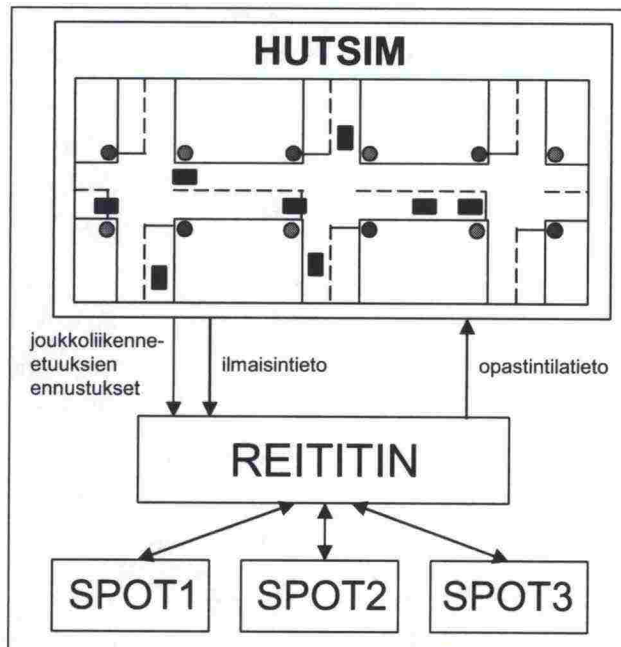
Kappaleessa kolme luetellut simuloinnin edut toteutuvat myös simulointiohjelmiston ja ohjauskojeen muodostamassa järjestelmässä. Ainoastaan simulointinopeuden on oltava reaaliaikainen, sillä koje toimii todellisessa ajassa. HUTSIM-simuloinnin avulla voidaan tarkastella kojeen toimintaa annetuilla parametrien arvoilla sekä sen ajoitusta ja vaiheistusta ennen kuin koje asennetaan ohjaamaan todellista liikennetilannetta. Eri ohjelmista saadaan liikenteen toiminnalliset kuvaukset, joiden perusteella voidaan valita sopiva ohjelma liittymälle. Kun kojeen ohjelman toimivuus on testattu laboratorioolosuhteissa, se voidaan siirtää todelliseen valo-ohjauksiseen liittymään ilman lisämuutoksia. (Kosonen 1996.)

Oikean kojeen liittäminen simulointiohjelmistoon tuottaa hyvän tuloksen yhden valo-ohjauksisen liittymän kuvauksesta. Kun halutaan simuloida useiden valo-ohjauksisten liittymien toimintaa, I/O -johtojen määrä kasvaa liian suureksi, ja toteutus on mahdoton. Sarjaliitännällä voidaan toteuttaa useiden kojeiden yhteissimulointi, mutta liitännä vaatii jokaiselle kojetyypille oman kaupallisen ohjelmiston. (Kosonen 1999.)

4.4.4. HUTSIM ja SPOT – alueellisen valo-ohjauksen simulointi

HUTSIM on liitetty myös SPOT-kojejärjestelmään, jossa useat kojeet yhdessä toteuttavat alueellista valo-ohjausta. SPOT-valojärjestelmässä toiminnallinen äly on hajautettu kojeisiin eli aluetta ei hallinnoida keskustietokoneen avulla. Sen toteuttama valo-ohjaus perustuu matemaattiseen optimointiin. SPOT on suunniteltu erityisesti joukkoliikennetuisuuksien toteuttamiseen. Kun valo-ohjaus saatiin toimimaan yhden todellisen kojeen avulla, toteutettiin Teknillisen korkeakoulun liikennelaboration ja ruotsalaisen TFK liikennetutkimuslaitoksen yhteistyönä tutkimus, jossa kehitettiin alueellisen kojejärjestelmän ja HUTSIMin välinen rajapinta. Perusidea oli edelleen sama eli todelliset kojeet tuottivat HUTSIMille opastintilat simuloidun liikennetilanteen perusteella. Liikenteen vihreän pyynnöt ja pidennykset ilmoitettiin normaaliin tapaan ilmaisintietojen avulla. (Kosonen, Davidsson 1994; Kronborg, Davidsson 2000.)

SPOT-simulointijärjestelmässä on useita tietokoneita, joista yhdessä on HUTSIM-ohjelmisto ja loput muodostavat SPOT-verkoston teollisuus-PC:istä. Järjestelmä on esitetty kuvassa 24. SPOT-asemat kommunikoivat keskenään sarjalinjaa pitkin. HUTSIM simuloi liikennetilannetta, jossa ilmaisimet laskevat niitä ylittäviä ajoneuvo-olioita. Ilmaisin laskee kolmen sekunnin aikana yli ajaneiden ajoneuvojen määrän. Tieto kerätään kaikilta ilmaisimilta ja lähetetään järjestelmän reitittimelle, joka edelleen lähettää oikean ilmaisintiedon oikealle SPOT-asemalle. Seuraavan valo-ohjauskierroksen vaiheet optimoidaan pysähdysten määrän ja viivytysten perusteella. Optimoidut opastimien tilat lähetetään HUTSIMiin, joka näyttää ne seuraavan kierroksen aikana. Todellisessa liikennetilanteessa SPOT-järjestelmä paikallistaa raitiovaunut ja ennustaa niiden saapumisen SPOT-ohjauksiseen liittymään. Kyseinen järjestelmä on mallinnettu myös HUTSIMiin siten, että raitiovaunuille tarkoitetut ilmaisimet tuottavat SPOT-järjestelmälle ennustetietoa raitiovaunujen saapumisesta liittymään. Tiedon avulla SPOT-kojeet toteuttavat joukkoliikenne-etuuden lisäämällä valo-ohjauskierrokseen ylimääräisen vaiheen, kun raitiovaunu saapuu liittymään. Jotta ylimääräinen vaihe ei aiheuta turhaa viivytystä muille liikkujille, raitiovaunun saapumisennusteen on oltava tarkka. (Kosonen, Davidsson 1994.)



Kuva 24. HUTSIM ja SPOT -järjestelmä (Kosonen, Davidsson 1994)

Järjestelmä testattiin Göteborgissa sijaitsevassa kolmen liittymän testialueella ja KTH:n simulointilaboratoriossa. Testauksen tavoitteena oli simuloida testausalue mahdollisimman realistisesti, jotta voidaan arvioida SPOT-järjestelmän ohjaustapoja. Toinen tavoite oli arvioida simulointijärjestelmään lisättyjä ominaisuuksia yleisesti. Liikennejär-

jestelmä kuvattiin HUTSIMiin yksinkertaisesti ja mahdollisimman realistisesti. Ilmaisinolioiden paikat mukailivat mallinnettavalla alueella sijaitsevien ilmaisimien mukaisesti. Joukkoliikenne-etuus toteutettiin HUTSIMiin samalla tavalla kuin se on järjestetty todellisten liittymien valo-ohjauksessa. (Kosonen, Davidsson 1994.)

Simuloinnin tuloksena SPOT-järjestelmä tuotti vähemmän viivytyksiä alueen ajoneuvoille kuin sen hetkinen todellinen valo-ohjaus. Myös päästöjen määrä ja bensan kulutus väheni merkittävästi SPOT-järjestelmän simuloinnissa. Projektin toinen merkittävä tulos on HUTSIMin graafisen käyttöliittymän havainnollinen kuvaus liikennetilanteesta. Ilman liikennetilanteen kuvausta projekti olisi ollut vaikea toteuttaa ja tarvittavia parametreja tuloksiin vaikea mitata. (Kosonen, Davidsson 1994.)

4.4.5. HUTCON – simulointiohjelmiston sisäinen valo-ohjaus

HUTSIMin sisäinen valo-ohjaus, nimeltään HUTCON, on toteutettu 90-luvun loppupuolella, kun Kosonen (1999) tutki simulointiohjelmiston periaatteita ja sovelluksia. HUTCONin valmistuttua simuloinnin opastinryhmät ovat itsenäisiä ja aktiivinen osapuoli mallissa. Valo-ohjauskokonaisuus päivittää itsenäisesti opastimien tilat, mutta päivityksen optimoinnissa voi käyttää muiden olioiden tuottamaa tietoa liikennetilanteesta. HUTCON perustui alunperin kiinteään valo-ohjaukseen ja vihreän pidennys - algoritmiin. Siihen on myöhemmin kehitetty myös sumean logiikan ohjausta. Valo-ohjauksen käytännön toteutuksesta on yleinen selvitys kappaleessa kaksi. (Kosonen 1999.)

HUTSIMissa valo-ohjaus on toteutettu hajautetusti eli mallinnettavan alueen opastintilat optimoidaan liittymäkohtaisesti. Periaatteessa opastinryhmät voivat keskenään kommunikoida mitkä suunnat liittymässä saavat vihreää. Simulointimalliin on kuitenkin toteutettu myös liittymäkohtainen kojeolio, joka käytännössä välittää kyseiset viestit eri opastinryhmien kesken. (Kosonen 1999.)

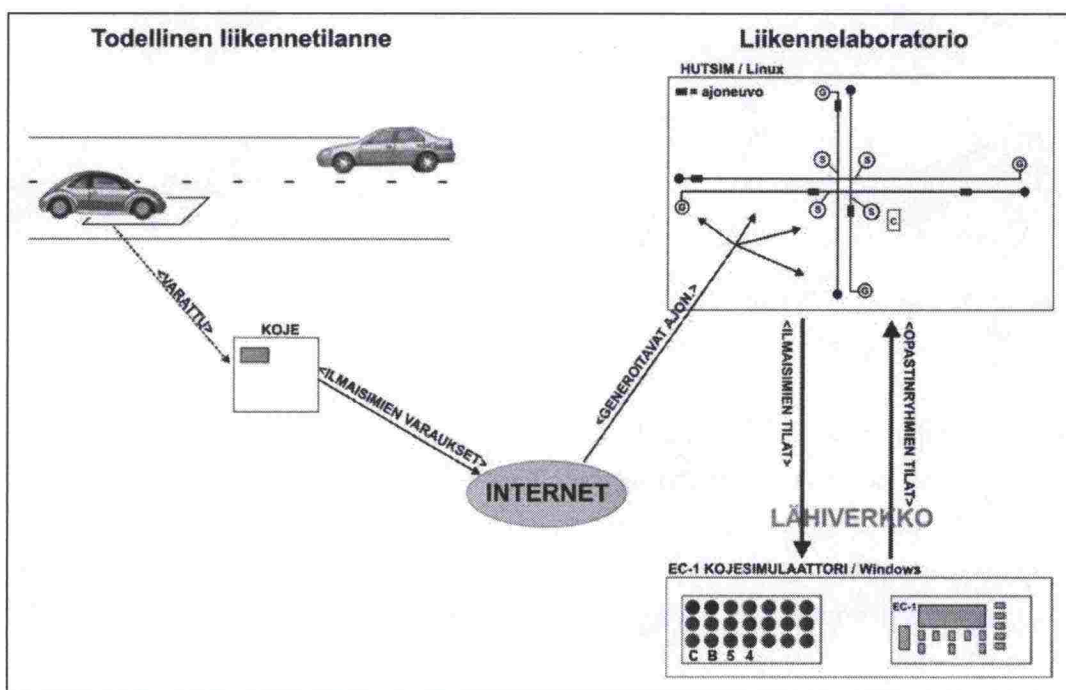
Se lukee myös käyttäjän asettamat parametrien arvot tekstitiedostosta. Kojeliön tyyppi valitaan sen mukaan, mitä ohjauslogiikkaa halutaan toteuttaa. Valo-ohjauksisten liittymien yhteenkytkentää varten HUTSIMissa on aluekoje-olio, joka välittää tietoa eri liittymäkohtaisten kojeiden välillä.

5. INTEGROIDUN SIMULOINTIJÄRJESTELMÄN TOTEUTUS

5.1. Järjestelmän yleiskuvaus

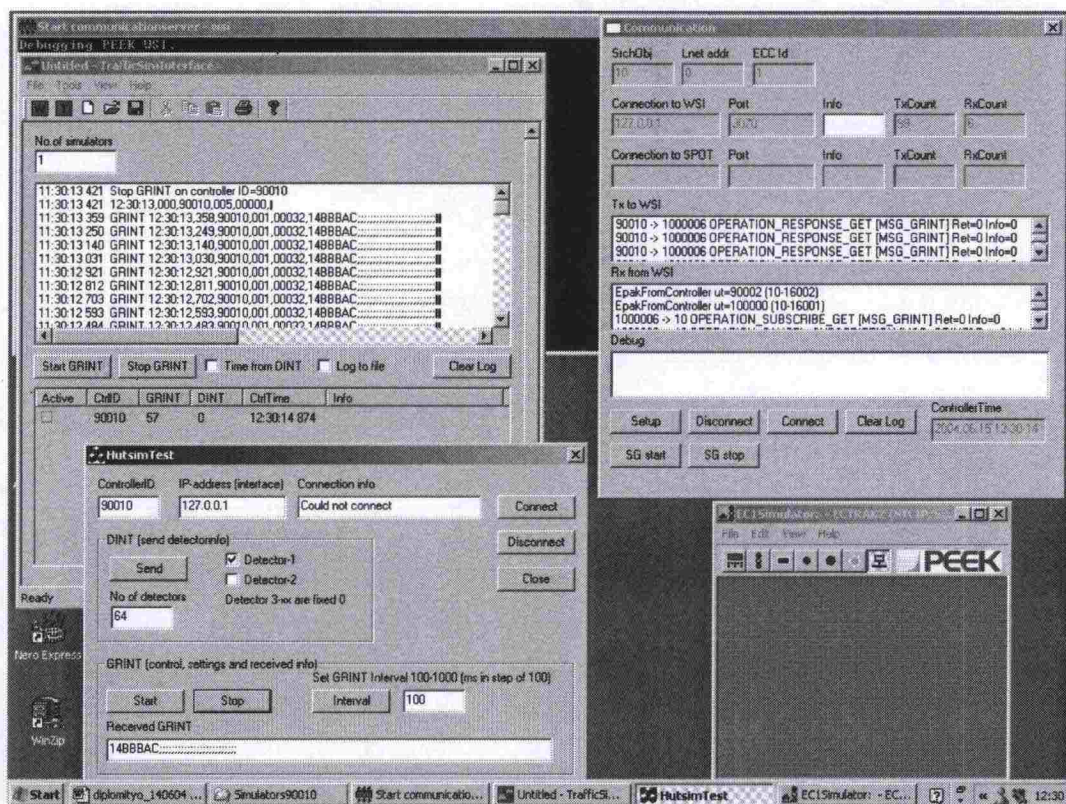
Integroitu järjestelmä tarkoittaa itsenäisesti toimivien eri järjestelmien muodostamaa kokonaisuutta, joka on toteutettu esimerkiksi tietoverkon avulla. Integroituun liikennesimulointijärjestelmään saadaan muista ohjelmistoista tietoa mallinnukseen ja järjestelmän käytettävyys paranee. HUTSIM-ohjelmistoa kehitettiin lisäämällä verkkorajapinta, jonka avulla simulointiohjelmistoon yhdistettiin muiden ohjelmistojen tuottamaa tietoa. Toteutettu järjestelmä voidaan jakaa kahteen erilliseen kokonaisuuteen, jotka tuottavat simulointimalliin valo-ohjauksen ja ajantasaisen liikennetiedon. Kumpikin osapuoli voidaan toteuttaa toisesta riippumatta, mutta ne tukevat yhdessä tarkemman ja käytännöllisemmän liikennesimuloinnin kehitystä.

Mallin tarkkuutta parannettiin käyttämällä ajantasaista liikennetietoa, jota lähetetään jatkuvalla syötteellä mallinnettavalta alueelta simulointilaboratorioon. Tarkkuutta edelleen ja käytettävyyttä parannettiin korvaamalla HUTSIMin sisäinen valo-ohjaus erillisellä kokesimulaattorilla, jonka toiminta on identtinen oikeiden kojeiden kanssa. Tällöin simuloinnin tuloksena saadut toimivat valo-ohjausparametrien arvot voidaan suoraan siirtää mallinnettavan alueen kojeisiin. Oheisessa kuvassa on esitelty yleiskuvaus kehityksestä simulointijärjestelmästä ja sen sisäisestä tiedonsiirrosta simuloinnin aikana. (Kuva 25.)



Kuva 25. Yleiskuvaus kehitetystä simulointijärjestelmästä.

Järjestelmän toteutuksessa käytettiin Linux-käyttöjärjestelmässä toimivaa HUTSIM-ohjelmistoversiota ja kokesimulaattoria, jonka käyttöjärjestelmänä on Windows XP, sekä liikennetiedon lähettämiseen tarkoitettuja Linux-käyttöjärjestelmässä toimivia laitteita. Kokesimulaattoriohjelmiston käyttöliittymä on esitetty kuvassa 26. HUTSIM-simulointimallista on tarkempi kuvaus kappaleessa 6.2. Liikenne- ja kokesimulaattorit on asennettava eri tietokoneisiin, sillä ne toimivat eri käyttöjärjestelmissä. Ohjelmistot kommunikoivat keskenään lähettämällä viestejä lähiverkossa. Kummankin simulaattorin isäntäkoneella on oma julkinen IP-osoite, vaikka tietokoneet sijaitsivat samassa lähiverkossa. Ajantasaisen liikennetiedon välityksessä käytettiin julkista runkoverkkoa eli Internetiä, sillä osa laitteista sijaitsee maastossa mallinnettavalla alueella.



Kuva 26. EC-1 kokesimulaattoriohjelmisto.

Järjestelmässä HUTSIM lähettää ilmaisintilamuutokset kokesimulaattorille, joka tulkitsee tilatietojen perusteella vihreän pyyntö- ja pidennystoiveet ja muuttaa opastinryhmi-en tilatietoja mahdollisuuksien mukaan. Jotta läsnäoloilmaisimien päällä seisovien ajoneuvo-olioiden vihreän pyynnöt huomioidaan ohjauksessa, HUTSIM lähettää myös keran sekunnissa tiedon ilmaisimien varauksista, vaikka niiden tilat olisivat pysyneet samoina. Kokesimulaattori lähettää liikennesimulointiohjelmistolle noin 10 kertaa sekun-

nissa liittymäkohtaiset opastintilaviestit, joiden mukaan simuloidussa liikennetilanteessa näytetään opastinkuvat.

Ajantasainen liikennetieto kerätään mallinnettavalta alueelta ilmaisimien avulla. Kun ajoneuvo ylittää ilmaisimen, tämä lähettää liittymäkohtaiselle kojeelle varaustiedon. Kojeiden keräämät liittymäkohtaiset ilmaisintilat lähetetään simulointilaboratorioon tietyin väliajoin. Viestistä hyödynnetään alueen reunailmaisimien varaustiedot, joiden mukaan mallin syöttöpisteet lähettävät ajoneuvo-olioita liikenneverkolle.

5.2. Tietoliikenneyhteyksien järjestäminen

Järjestelmän tietoliikenneyhteydet käyttävät IP- ja TCP-protokollia. Järjestelmää suunniteltaessa pohdittiin UDP-protokollan käyttöä TCP:n sijasta. Tällöin matkalle hävinnyt viesti ei aiheuttaisi lisäviestien lähetystä. Jos ilmaisintilaviestejä lähetetään vähintään kymmenen kertaa sekunnissa, hävinneen viestin uudelleen lähettäminen ei ole kannattavaa. Ajoneuvon aiheuttama ilmaisimen varaus näkyy useammassa viestissä, jolloin kaikkien viestien ei tarvitse saapua simulointilaboratorioon. Tällä hetkellä maastossa olevan laitteiston maksimilähetysnopeus on noin seitsemän viestiä sekunnissa, jolloin viestien häviäminen matkalle voi aiheuttaa virheitä mallintamisessa. Tästä syystä päätettiin käyttämään TCP-protokollaa.

Ajantasaisen liikennetiedon viestiyhteydessä käytetään sovellusprotokollaa nimeltään XMPP (*Extensible Messaging and Presence Protocol*). Se soveltuu pienien tietoliikennepakettien mahdollisimman ajantasaiseen viestintään. Protokolla käyttää XML-viestimuotoa, joka on tapa merkata tekstidokumentteja. XML mahdollistaa nopean ja tahdistamattoman viestinvaihdon suhteellisen vähällä tietoliikenteen kuormittamisella. Se tarjoaa yhtenäisen rajapinnan kaikkien tietoon ja universaalin tavan käsitellä viestejä. XML-viesti on käytännössä kuin tietovirta, joka avataan ja suljetaan määritetyillä merkeillä. Tietokentän avauksessa käytetään merkkiä "< >". Sulkemisessa merkkiin lisätään kenoviiva "</ >". Sulkeiden sisään kirjoitetaan sopiva nimi kuvaamaan tietokenttää. Kuvassa 27 on esimerkki XML-viestistä eli tietovirrasta. XMPP-protokollan mukaisessa viestinnässä tarvitaan vain esimerkkiviestin message-kenttää. Sen sulkeissa olevan tunnistenumeron ja lähetysosoitteen perusteella viesti yksilöidään oikeaan paikkaan ja oikealle sovellukselle. (Saint-Andre 2004.)


```
<message id="1234" to =user@server/resource>  
<subject>  
  Viestin aihe...  
</subject>  
<body>  
  Viesti tähän...  
</body>  
</message>
```

Kuva 27. Esimerkki XML-viestin rakenteesta. (Saint-Andre 2004)

Simulointijärjestelmän viestiyhteyksien toteutuksissa käytetään asiakas ja palvelin-arkkitehtuuria. Ajantasaisessa viestiyhteydessä käytetyn XMPP-protokollan mukaisen palvelimen voi ladata Jabber Softwarefoundationin kotisivuilta (www.jabber.org) veloituksetta. Kyseinen järjestö on erikoistunut kehittämään lähes reaaliaikaista viestintää tietoliikenneverkossa. XMPP-protokollan mukaisessa viestiyhteydessä jokainen asiakas määritetään yksilöivän tunnisteiden avulla (Saint-Andre 2004). Tunniste voi olla esimerkiksi "koje1@hutsim/prosessi1", jossa *koje1* on kojeen tunnistenumero, *hutsim* on Jabber-palvelimen tunniste ja *prosessi1* on lähettävän laitteiston prosessin tunniste. Osoitteen viimeisin osa mahdollistaa asiakkaan avaavan palvelimelle monta yhteyttä samaan aikaan (Saint-Andre 2004). Jabber-palvelimen asiakkaana on oltava ohjelmisto, jonka rajapinta on suunniteltu XML-viestien tulkitsemiseen. Myös asiakasohjelmiston voi ladata Jabberin kotisivuilta veloituksetta. Saatavat ohjelmistot on tarkoitettu lähinnä tosiaikaiseen verkon kautta tapahtuvaan useamman henkilön keskinäiseen viestinvaihtoon. HUTSIMille kehitettiin erillinen Jabber-asiakas, joka toteuttaa rajapinnan Jabber-palvelimen ja HUTSIMin välille. Samoin ajantasaisen järjestelmän toiselle asiakkaalle eli mallinnettavan alueen laitteistolle kehitettiin Jabber-asiakas rajapinnaksi. Se toteuttaa myös rajapinnan tuleville ja lähteville XML-viesteille. Koska HUTSIM- ja Jabber-asiakas-ohjelmistot ovat asiakkaita, niiden väliseen tietoliikenneyhteyteen tarvitaan palvelin. Sen toteutus on yksinkertainen. Palvelin ainoastaan vastaanottaa ja edelleen lähettää viestejä.

HUTSIMin ja EC-1 simulaattorin välisen tietoliikenneyhteyden palvelimena toimii Peek Trafficin kehittämä WSI-palvelin. Simulaattorit toimivat asiakkaina eli ne ottavat yhteyden palvelimeen tietyn portin avulla. Palvelin vastaanottaa ja edelleen lähettää viestin toiselle osapuolelle. Se toimii Windows-käyttöjärjestelmässä.

HUTSIM avaa järjestelmän viestiyhteydet simuloinnin alkuasetusten aikana automaattisesti. Kun liikennesimulointi päättyy tai se keskeytetään, HUTSIM sulkee tietoliikenneyhteydet. Jatkettaessa simulointia keskeytyksen jälkeen ohjelma muodostaa uudestaan tietoliikenneyhteydet järjestelmän palvelimien kanssa.

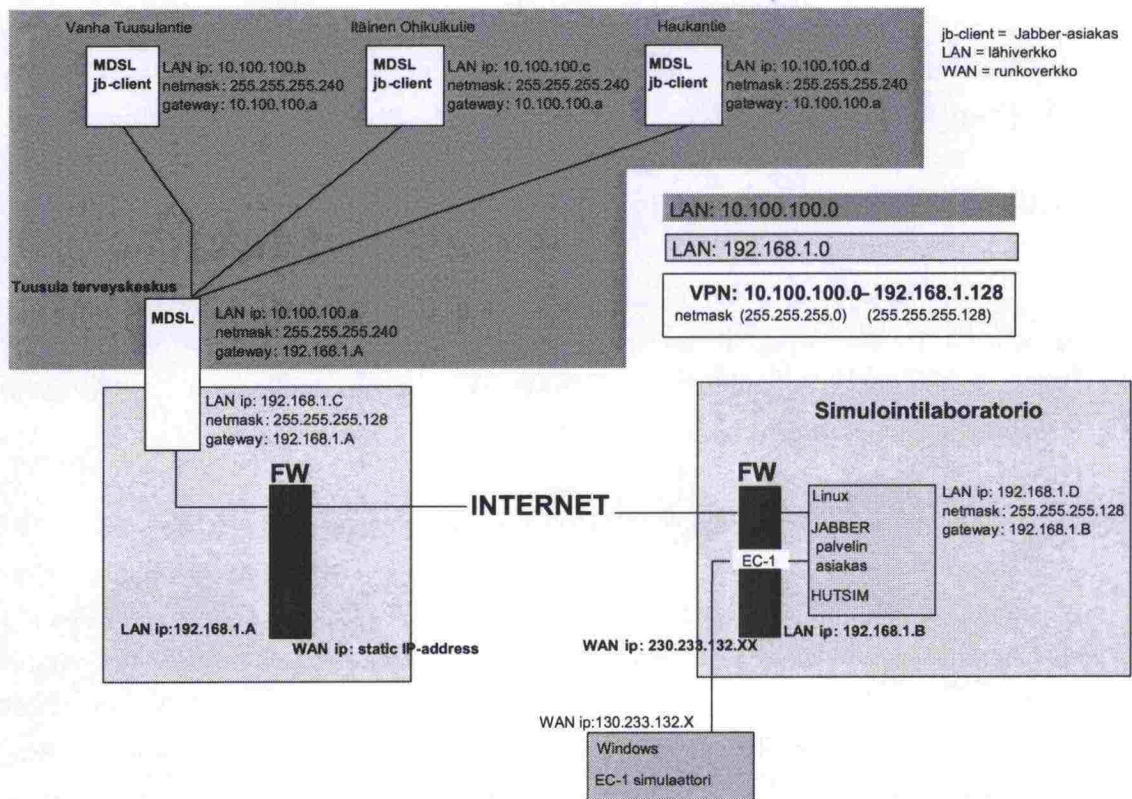
HUTSIMin sisäisenä verkkorajapintana toimii aluekoje. Se avaa HUTSIMin soketit, joiden avulla voidaan lukea ja kirjoittaa tiettyyn määriteltyyn verkkoyhteyteen (Hassinen 2004). Muodostettu yhteys on toteutettu oliona, joka vastaanottaa ja lähettää viestit. Koska järjestelmän kumpikin viestiyhteys on oma olio, eri järjestelmiltä saapuvat viestit toteutetaan eri algoritmeissa. Aluekoje sopii hyvin rajapinnaksi, koska sillä on parametrien arvoina mallin liittymäkohtaisten kojeiden ja generaattoreiden tunnistenumerot. Siinä simuloinnin aikana voidaan toteuttaa viestissä saapuneen tiedon mukainen tapahtuma oikeassa opastimessa tai generaattorissa.

Ajantasainen viestiyhteys käyttää kaikille käyttäjille avointa runkoverkkoa eli Internetiä. Tämä altistaa järjestelmän mahdollisille tietoturvariskeille kuten palvelunestohyökkäyksille tai salakuuntelulle. Kyseinen viestiyhteys on tietoturvattu palomuuereilla. Simulaattorien välinen tietoliikenne on toteutettu ilman erillistä suojausta, sillä tietokoneet sijaitsevat samassa lähiverkossa. Palomuurit sijaitsevat tietoturvallisen paikallisverkon päätepisteessä, ennen runkoverkkoa. Ne muodostavat VPN-yhteyden (*virtual private network*) Internetin yli. Simulointilaboratoriossa Jabber-palvelimen ja runkoverkon välille asetettu palomuuuri hyväksyy tietoliikenteen ainoastaan etukäteen määritetyistä IP-osoitteista tai verkkoalueelta. Samoin liikennetietoa lähettävien laitteiden ja runkoverkon välille asennettu palomuuuri hyväksyy tietoliikenteen ainoastaan tietyistä IP-osoitteista. Palomuurissa voidaan myös hyväksyä tietyn portin kautta tuleva liikenne. Tällöin palomuuuri ei estä järjestelmässä käytettävien ohjelmistojen viestintää, jos avataan ohjelmiston käyttämä portti tietoliikenteelle.

Palomuuuri voi olla ohjelmisto, laite tai molempia. Kehitettyssä järjestelmässä käytetään erillistä palomuurilaitetta, sillä liikennealueella sijaitsevaan laitteistoon ei ole mahdollista asentaa palomuuriohjelmistoa sen rajoitetun muistikapasiteetin takia. Järjestelmän palomuurit ovat identtiset, jolloin niiden käyttöönotto on helpompaa. Asetusten määrittäminen eli konfigurointi on vaativa operaatio. Yleensä virheellisesti konfiguroitu palomuuuri estää kaiken tietoliikenteen, myös järjestelmässä toivotun tiedonvälityksen. Palomuurin tehdasasetuksissa tietoliikenne on yleensä estetty, jolloin asetuksia muuttamalla päästetään tietyistä laitteista tai portista tuleva liikenne läpi. Pahimmassa tapauksessa väärin konfiguroitu palomuuuri heikentää järjestelmän turvallisuutta. Väärin asetuksin toimivan palomuurin vika voi olla vaikea huomata, sillä järjestelmä toimii halutulla tavalla. Todellisuudessa väärin konfiguroitu palomuuuri ei välttämättä suojaa lähetettävää liikennettä tai estä ulkopuolisten laitteiden lähettämiä paketteja.

Järjestelmän verkkototeutuksesta piirretty kaavio on kuvassa 28. Tietoturvallisuuden takia järjestelmässä käytettyjä IP-osoitteiden numeroista osa on korvattu kirjaimilla, muuten kuvaus on identtinen toteutetun verkon kanssa. MDSL-laitteet keräävät ajan-

tasaista liikennetietoa ja lähettävät sen liikennelaboratorioon. Laitteista on tarkempi selvitys ajantasaisen järjestelmäkuvauksen yhteydessä. Maastossa olevien laitteiden silta runkoverkkoon sijaitsee Tuusulan terveyskeskuksessa. Järjestelmässä on kaksi lähiverkkoa. Toisen lähiverkon ovat muodostaneet MDSL-laitteet ja toisen palomuurit. Palomuuriin on yhdistetty Ethernet kaapelin avulla tietokone, jonka verkkoasetuksissa palomuuuri asetettiin koneen reitittimeksi. MDSL-lähiverkon ja simulointilaboratoriossa sijaitsevan lähiverkon välille muodostettiin VPN-yhteys, joka mahdollistaa salatun tietoliikenneyhteyden kahden aliverkon välillä. Palomuuireihin määritettiin myös porttinumeroita, joiden kautta voidaan lähettää paketteja suojattuun verkkoon. EC-1 simulaattorin ja palomuurin takana olevan HUTSIMin välille saatiin esteetön tietoliikenneyhteys palomuurin avoimen portin avulla.



Kuva 28. Järjestelmän tietoverkko rakenne.

5.3. Tiedonvälityksessä käytettävien viestien formaatit

5.3.1. Liikenne- ja kokesimulaattorin väliset viestit

Järjestelmässä lähetettävien viestien muodon ja sisällön täsmällinen määrittäminen oli merkittävä osa kehitystyötä, jotta eri ohjelmistojen rajapinnat pystyivät tulkitsemaan samoja viestejä yksiselitteisesti. Koska simulointijärjestelmässä yhdistettiin eri ohjelmistoja, jotka suunniteltiin ja tuotettiin eri osapuolten toimesta, viestien rakenne määritettiin yhteistyössä ohjelmistojen tuottajien kanssa. Simulaattorien välinen viestityyppi kehitettiin Ruotsin Peek Trafficin kanssa ja ajantasaisen liikennetiedon viestityypit suunniteltiin yhteistyössä Suomen Peek Trafficin kanssa.

EC-1 kokesimulaattorin tiedonvälityksessä käytettävien viestien sisällöt ja niiden rakenne määritettiin HUTSIMin rajapinnalle. Simulaattorien välisessä viestissä tieto on tallennettu ASCII merkein, ja muuttujien arvot on eritelty pilkulla. Viestityypiksi valittiin tekstirivi, koska se on ohjelmistoriippumaton ja yksikertainen toteuttaa. Oheisessa kuvassa on selvitys simulaattoreiden välisen viestin sisällöstä.

HUTSIM-EC-1 kokesimulaattori

HH:MM:SS,MS,ID,Tyyppi,Tiedonpituus,Tieto[cr]

HH = tunti 00..23

MM = minuutti 00..59

SS = sekunti 00..59

MS = millisekunti 000.999

ID = kojeen tunnistenumero 1..99999

Tyyppi = lähetettävän tiedon tyyppinumero 001..008

Tiedonpituus = Tietomuuttujan pituus merkkeinä 00000..99999

Tieto = lähetettävä tieto (esimerkiksi ilmaisimien tai opastimien tilatieto)

[cr] = viesti päättyy rivinvaihtomerkkiin (carriage return)

Kuva 29. HUTSIMin ja kokesimulaattorin tiedonvälityksessä käytettävän viestin muoto ja viestissä olevat muuttujat.

Viestin neljäs muuttuja eli viestityyppi määrittelee mitä tietoa viesti sisältää. Oheisessa taulukossa on lueteltu eri tietotyypit ja niiden selitykset.

Kojesimulaattori käyttää samoja opastintilan ASCII-merkkejä kuin tavallinen liittymäkohtainen koje. Opastintilat on lueteltu *taulukossa 2*. Viestissä ASCII-merkit ovat kojeeseen määritetyssä opastinryhmäjärjestyksessä. Ilmaisintilaviestissä ilmaisimien varauksia kuvaavat luvut ovat ilmaisinsiirteiden järjestyksessä. Ilmaisintilat on merkitty samalla tavalla kuin todellisessa liikennetilanteessa. Varattu ilmaisin saa arvokseen yksi, muuten sen arvo on nolla. Painonappiviestissä tilat on ilmoitettu samoin kun ilmaisintilaviestissä. Nolla tarkoittaa, ettei painonappi ole aktivoitu, ja luku yksi, että jalankulkija tai pyöräilijä pyytää vihreää valoa. Yhteyden hallintaviesteissä järjestelmälle ilmoitetaan milloin viestien lähettämisen voi aloittaa ja koska viestien lähettäminen päättyy. Ajantasaisessa liikennetietojärjestelmässä avaus- ja sulkemisviestit sisältävät tiedon halutusta viestityypistä ja lähetysnopeudesta. Simulaattorien välisessä viestinnässä kyseiset viestit ovat tyhjiä, mutta ajantasaisessa liikennetietoviestinnässä niiden avulla ilmoitetaan viestityyppi ja lähetysnopeus. *Taulukon 6* esimerkissä yhteyden avaus- ja sulkemisviesteissä haluttu viestityyppi on ilmaisintilaviesti (002) ja viesti lähetetään 10 kertaa sekunnissa (1). Taajuusviestityypissä voidaan määrittää kuinka usein liikennesimulointiohjelmistoon lähetetään tilaviestejä. Oletusarvona on 0100, joka tarkoittaa 10 kertaa sekunnissa. Nopeusviestissä kojiesimulaattorin sisäinen kello voidaan muuttaa reaaliaikaa nopeammaksi. Oletusarvona on 01, joka tarkoittaa nopeuden olevan sama kuin reaaliaika. Simulaattorin sisäinen aika voidaan muuttaa kaksi, neljä tai kymmenen kertaa nopeammaksi kuin todellinen aika. Virheviestissä 00 tarkoittaa, ettei viestiä ole toteutettu. Kun virheviesti on 01, lähetetty viesti on ollut vääränpitoinen. Muiden virheiden sattuessa, viestissä vaihtelee luku 02–99.

5.3.2. Ajantasaiset liikennetietoviestit

Erityisesti ajantasaisessa liikennetietoviestijärjestelmässä viestien yhtenäisen formaatin toteutus on tärkeää, sillä osa laitteistosta asennetaan maastoon, jonne voi olla hankaluuksia päästä, kun testataan järjestelmän toimivuutta. Jos viestin rakenteeseen tehdään muutoksia, tarvittavat muutokset on tehtävä koko järjestelmään. Koska jälkikäteen tehdyt muutokset ovat hankala toteuttaa erityisesti maastossa sijaitsevien laitteiden osalta, myös mahdollinen tulevaisuudessa tehtävä kehitystyö on otettu huomioon viestiformaatteja määritettäessä ja laitteita ohjelmoitaessa. Viestien rakenne määritettiin siten, että se on yleispätevä, ja sitä voidaan käyttää eri ohjelmistoalustoilla. Viestissä on oltava kaikki tarpeellinen tieto kuitenkin niin, että mallinnettavien liittymien suuri määrä ei hidasta tai hankaloita merkittävästi tiedon lähettämistä ja perille pääsyä.

Ajantasaisten liikennetietoviestien lähtökohtana oli sama tekstirivi, joka toteutettiin simulaattorien välisessä tiedonvälityksessä (kts. kuva 29). Näiden viestien välityksessä käytetyn XMPP-protokollan takia haluttu tieto mallinnettavalta alueelta pakattiin XML -muotoon. Kehitystyötä ei rajattu vain tämän työn puitteissa toteutettaviin viestityyppeihin, vaan mietittiin myös jatkokehitysmahdollisuuksia. Viestityypit on kuvattu taulukossa 7. Simulointijärjestelmässä ajantasaisista viestityypeistä toteutettiin ilmaisintilaviesti, kojeviesti ja virheviesti. Maaston laitteistoon ohjelmoitiin myös ominaisuus, jonka avulla voidaan lähettää ajantasaisia opastintilaviestejä. Kehitetyssä simulointijärjestelmässä kyseistä viestiä ei käytetä, sillä opastintilat simuloidaan kokesimulaattorin avulla. Tutkimukseen valitulta alueelta ei saatu ajoneuvokohtaiseen viestiin tarvittavia tietoja, sillä reunailmaisimissa on vain yksi silmukka. Ajoneuvokohtaisen viestin lähettäminen ei ole tässä tapauksessa tarkoituksenmukaista, kun saman informaation voi lähettää ilmaisintilaviestillä.

Taulukko 8. Reaaliaikaisesti lähetettävien viestien muoto ja sisältävät tietotyypit

Viestityyppi	Esimerkki viestistä
ilmaisintila	<code><x xmlns='jabber:x:peekhutsim'> <detectors time='11:20:01.503' status='10011100000000000000000000000000' /> </x></code>
painonappi	<code><x xmlns='jabber:x:peekhutsim'> <buttons time='11:20:01.503' status='10011100000000000000000000000000' /> </x></code>
opastintila	<code><x xmlns='jabber:x:peekhutsim'> <signals time='11:20:01.503' status=' 4444BB,.....' /> </x></code>
ajoneuvo-kohtainen	<code><x xmlns='jabber:x:peekhutsim'> <vehicle time='12:20:10.333' detId='3' dir='01' speed='80' hw='12.805' gap='9.22' vehlen='4.20' vehtype='01' /> </x></code>
kojeviesti	<code><x xmlns='jabber:x:peekhutsim'> <msgreq type='detetcor' req='start' interval='100' /> </x></code>
virheviesti	<code><x xmlns='jabber:x:peekhutsim'> <error type='2' /> </x></code>

XML-viesti muodostetaan Kuvassa 27 esitetyn viestiesimerkin mukaisesti. Viestistä voidaan jättää subject- ja body-tietokentät pois, sillä ne jäävät tyhjiksi ja turhaan kuormittavat tietoverkkoa. Viestin loppuun ennen lopetusmerkkiä (`</message>`) lisätään taulukosta 8 sopiva liikennetieto, jonka laitteisto mittaa liikennetilanteesta. Viestiyhteys aloitetaan kojeviestillä, jolloin pyyntö (*req*) saa arvon start ja lähetysnopeudeksi (*interval*) asetetaan haluttu nopeus, jolla maaston laitteisto lähettää ilmaisintilaviestejä simulointiohjelmistoon. Yhteys päätetään samalla kojeviestillä, mutta silloin pyyntö saa arvokseen stop. Muiden viestityyppien tietosisältö on sama kuin simulaattorien välisissä viesteissä. Tieto on vain tallennettu erilailla XML- ja tekstiviesteissä. Lähetetty ilmaisintieto voisi olla kuvan 30 esimerkin mukainen.

```
<message id="90010"to user=tuusula@hutsim/prosessi1>
<x xmlns='jabber:x:peekhutsim'>
<detectors time='11:20:01.503'
status='10011100000000000000000000000000' />
</x>
</message>
```

Kuva 30. Esimerkki reaaliaikaisesta ilmaisintietoviestistä pakattuna XML muotoon

Yhteen XML pakettiin on mahdollista kerätä useampi samantyyppinen liikennetieto. Tietoliikennettä syntyy silloin vähemmän, mutta osa viesteistä saapuu laboratorioon viiveellä. Toisaalta verkon kapasiteetin ylitys aiheuttaa huomattavasti pidempiä viivytksiä, jos viestit jäävät jonottamaan lähetysvuoroaan reitittimien puskureihin.

Ajoneuvokohtaisessa viestityypissä on yksittäisen ajoneuvon tiedot muuttujien arvoina. Kun ajoneuvo ohittaa mittauspisteen, laitteisto tallentaa kaiken mahdollisen tiedon viestiin. Tiedon tarkkuus ja määrä riippuvat mittauslaitteistosta. Viestiin voidaan konfiguroida enemmän tietokenttiä kuin mitä laitteisto pystyy mittaamaan. Tyhjen tietokenttien arvoksi asetetaan nolla. Viesti lähetetään, kun ajoneuvo ohittaa mittauspisteen. Ilmaisintila- ja painonappiviestissä on liittymäkohtaisen kojeen kaikkien ilmaisimien tai painonappien tiedot. Opastintilaviestissä on kojeen kaikkien opastinryhmien opastintilat. Alueellisten viestien lähetysnopeudet voidaan määrittää vakiona ennen simuloimista. Jos mallinnettavalla alueella on paljon liikennettä, aiheuttaa ajoneuvokohtainen viestityyppi enemmän tietoliikennettä kuin alueellista tietoa sisältävät viestit, mikä on otettava huomioon mitoittaessa verkon kapasiteettia.

5.4. HUTSIMin ja EC-1 kojесimulaattorin välisen tietoyhteyden toteutus

Koje- ja liikennesimulaattorin välillä on rajapintaohjelmisto nimeltään TrafficSimInterface. Se saa ilmaisintilaviestit WSI-palvelimelta, jonka toisena asiakkaana on HUTSIM. WSI-palvelin vastaanottaa kojесimulaattoreilta opastintilaviestit ja edelleen lähettää ne TrafficSimInterface ohjelmalle. Kun TrafficSimInterface yhdistetään liikennesimulointiohjelmistoon WSI-palvelimen välityksellä, voidaan aloittaa opastin- ja ilmaisintilaviestien lähettäminen. TrafficSimInterface näyttää käyttöliittymässään tarvittaessa simulaattoreiden vaihtamat viestit kirjoittaen viestiyhteystapahtumat joko käyttöliittymään tai lokitiedostoon. TrafficSimInterface on osa kojесimulaattoria ja siten Peek Trafficin kehittämä kuten myös WSI-palvelin. Ohjelma ja palvelin toimivat Windowsin XP-käyttöjärjestelmässä.

HUTSIMiin on ohjelmoitu asiakasluokka, jonka ilmentymänä on sokettiyhteyden avaava olio. Olion avulla otetaan yhteys IP-osoitteessa olevaan porttiin, lähetetään ja otetaan vastaan viestit sekä suljetaan yhteys. WSI-palvelimen IP-osoite annetaan muuttujan arvoksi aloitustiedostosta ohjelman käynnistyessä.

Kun HUTSIM saa uuden opastintilaviestin, erotetaan viestin tiedot eri muuttujien arvoiksi. Viestin lopussa olevat opastimien tilatiedot käydään läpi while-toistolauseen avulla. Lauseke toistetaan, kunnes luettava merkki on kaksoispilkku. Toistolausekkeessa kutsutaan funktiota, jonka parametrien arvoiksi annetaan liittymäkohtaisen ko-

jeen ja opastimen tunnistenumerot sekä kokesimulaattorilta saatu opastimen tilatieto. Kojeen tunnistenumero saadaan viestistä. Opastinolin tunnistenumero saadaan puolestaan while-lauseen toistokerrasta, sillä viestin tilatiedot ovat tietyssä opastinryhmäjärjestyksessä, jonka mukaan HUTSIMin opastinolioiden tunnistenumerot on määritetty. Toistolauseessa kutsuttu funktio antaa tunnistenumeroitten perusteella oikealle opastinoliolle viestistä luetun tilatiedon.

Opastintilan ASCII-merkit (*taulukko 2*) on muunnettu HUTSIMissa opastinkuvan väreiksi (punainen, vihreä, keltainen ja punakeltainen). Käyttöliittymän toteuttamassa graafisessa liikenneverkkomallissa opastinkuvat näyttävät värin ja ASCII-merkin. Merkin perusteella käyttäjä voi tarkistaa simuloinnin toimivan kokesimulaattorin ohjauksen mukaisesti. Mallin ajoneuvo-oliot ja muut liikkujat tulkitsevat opastinkuvan ainoastaan värin mukaan aivan kuten todellisessa liikennetilanteessa.

Kokesimulaattoreille lähetettävät vihreän aloitus- ja pidennyspyynnöt on toteutettu HUTSIMissa olevien ilmaisinalioiden avulla. Jokainen ilmaisinalio on yhdistetty liittymäkohtaiseen kojeolioon. Liittymän ilmaisimien tilatiedot muodostavat tekstirivin, jossa on ilmoitettu jokaisen ilmaisimen varaus ilmaisilogiikkajärjestyksessä. Kun kojeen ilmaisimien tilat muuttuvat, muodostetaan kyseinen tekstirivi. Koska läsnäoloilmaisimien pyyntö ei jää kokesimulaattorin muistiin, HUTSIM lähettää kerran sekunnissa liittymien ilmaisintilat, vaikka tiloissa ei olisi tapahtunut muutoksia. Ennen kuin tekstirivi lähetetään WSI-palvelimelle, rivin alkuun lisätään tarvittavat aika- ja kojettunnistiedot ja perään rivinvaihtomerkki. Viestin sisällön tarkempi kuvaus on kappaleessa 5.3.

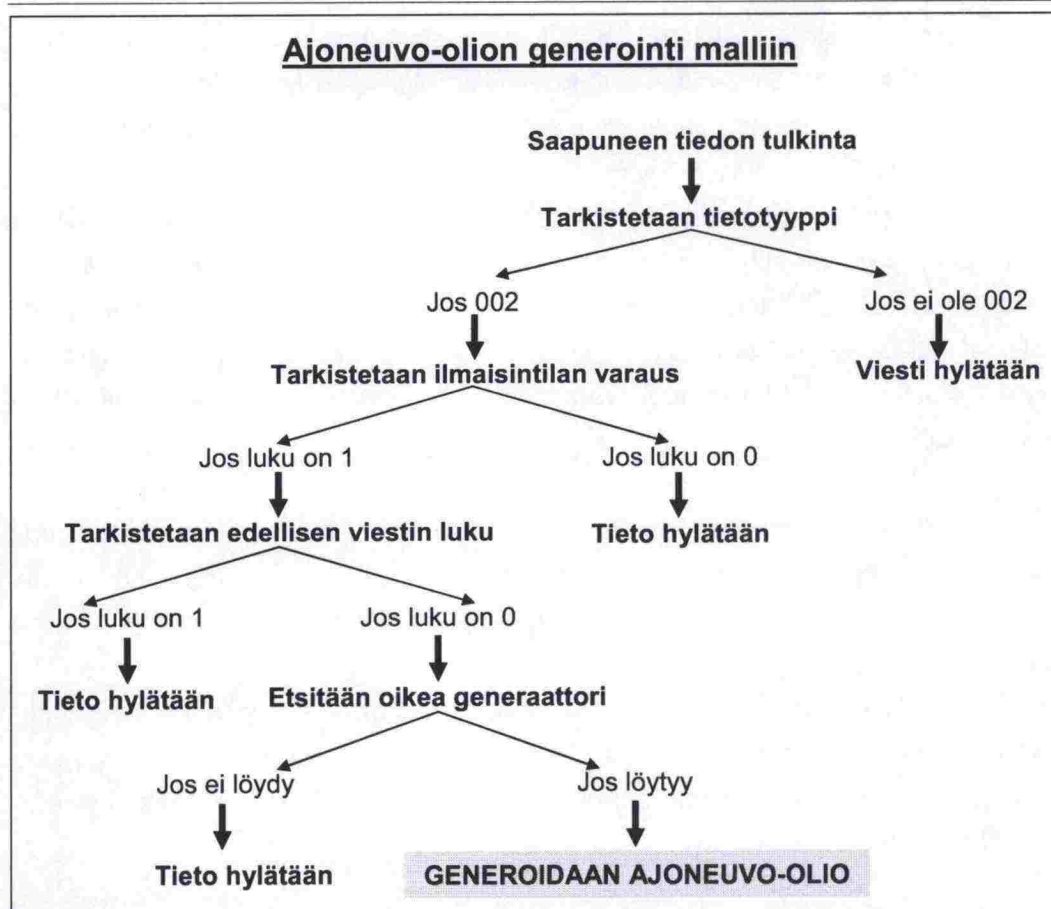
5.5. Ajantasaisen liikennetiedon käytön toteutus HUTSIM-ohjelmistossa

Ajantasaisen liikennetiedon hyödyntäminen simuloinnissa toteutettiin mallinnettavan alueen ilmaisintilatiedoilla, joiden perusteella syöttöpisteet tuottavat malliin ajoneuvo-olioita. Järjestelmässä on toteutettu yksinkertaistettu Mansfieldin kaltainen ajantasainen simulointijärjestelmä (kts 4.4.2). Erona Mansfieldin järjestelmään on, että kehitetyssä simulointijärjestelmässä ei hyödynnetä mallinnettavan alueen sisäisten ilmaisimien tilatietoja eikä siinä ole DIMEn kaltaista muistin hallintaa. Myös valo-ohjaus on toteutettu eri tavalla. Kehitettyssä järjestelmässä keskityttiin lähinnä kokeilemaan uuden laitteiston tuomia mahdollisuuksia liikennetiedon keräämisessä ja kerätyn tiedon hyödyntämisessä liikennemallinnuksessa. Mansfieldin järjestelmän tavoitteena oli mallintaa sen hetkinen liikennetilanne simuloinnin avulla. Uuden järjestelmän tavoitteena on tuottaa vain tarkka liikenteen syöttötieto malliin.

Ajantasaisen simulointijärjestelmän toteutusta varten liikennetietoa kerääviin kojeisiin asennettiin Peek Trafficin kehittämä uusi lisälaite, nimeltään MDSL-yksikkö. Ne ovat yksinkertaisia tietokoneita, joiden käyttöjärjestelmänä on Linux. Tämä mahdollistaa järjestelmässä sovellusten välisen nopean tietoliikenneyhteyden. Yksiköt muodostavat yhtenäisen lähiverkon, jossa ne toimivat verkon reitittimenä ja siltana runkoverkkoon. Lähiverkossa jokainen liittymäkohtainen koje tarvitsee oman MDSL-yksikkönsä. Laitteet muodostavat verkoston siten, että yhteen yksikköön voidaan liittää kolme muuta yksikköä. MDSL-yksiköistä muodostettu lähiverkko on riippumaton kojeiden tyypistä, minkä ansiosta erilaiset kojeet tuottavat järjestelmälle yhtenäistä liikennetietoa. (Peek Traffic Oy 2003a.)

MDSL-yksikköön toteutettu ohjelmisto muuttaa kojeen tuottaman ilmaisintilatiedon XML-viestiksi, joka lähetetään simulointilaboratoriossa sijaitsevalle Jabber-palvelimelle. XML-viestien tiedon jäsentämiseen on valmiita jäsennykirjastoja, joiden algoritmeja hyödynnettiin ohjelmoinnin nopeuttamiseksi. Koska kirjastoja ei ole ohjelmoitu HUTSIMissa käytetyllä Pascal-kielellä, viesti tulkitaan apuohjelmalla. Aiemmin esitelty Jabber-asiakasohjelmisto toteuttaa järjestelmän XML-viestien jäsentämisen. Se muokkaa saapuvan viestin tekstiriviksi, jonka muoto on sama kuin simulaattorien välisessä viestinnässä (kuva 29). Jäsennetty tekstirivi lähetetään edelleen HUTSIMille.

Kun ajantasainen liikennetietoviesti saapuu HUTSIMiin, ohjelma käy monta ehtoa läpi, joista jokaisen on oltava tosi ennen kuin ajoneuvo-olio syötetään malliin (kuva 31). Viestissä oleva tieto on erotettu pilkuilla ja se jaetaan eri muuttujien arvoiksi samalla tavalla kuin simulaattorien välinen opastintilaviesti. HUTSIM erottaa ilmaisintilaviestit muista viesteistä tietotyyppimuuttujan arvon avulla. Jos tietotyyppi on oikea eli muuttujan arvo on 002, HUTSIM käy toistolauseen avulla ilmaisintilat yksitellen läpi. Jos ilmaisim on varattu eli luku on yksi, tarkistetaan, ettei kyseinen ilmaisim ollut varattu myös edellisessä viestissä. Jokaisella liittymäkohtaisella kojeoliolla on taulukkomuotoinen muistitila, jossa on edellisen viestin ilmaisintilat. Jos edellisessä viestissä kyseisen ilmaisintilan arvo oli nolla, valitaan mallista syöttöpisteolio, jolle on tallennettu viestistä saadun liittymäkohtaisen kojeen tunnistenumero. Oliolle on myös tallennettu sen ilmaisimen ilmaisilogiikkamnumero, jonka varaustilasta syötetään uusi ajoneuvo-olio malliin. Jos varatun ilmaisimen tunnistetiedot täsmäävät jonkun generaattorin tietoihin, syötetään malliin ajoneuvo-olio kyseisestä generaattorista. Muuten ilmaisimen varaus ei aiheuta muutosta mallissa.



Kuva 31. Ajoneuvo-olion generointia edeltävät vaiheet HUTSIMissa.

5.6. Integroidun simulointijärjestelmän testaus

Järjestelmää testattaessa otettiin huomioon sen toimintavarmuus, viestiyhteyksien eheys, viestien viivytykset, todellisten ajoneuvojen määrä simuloituun tilanteeseen verrattuna sekä mahdollisesti HUTSIMissa syöttöpisteen puskuriin joutuvat ajoneuvot. Testauksen aikana järjestelmän tapahtumat tallennettiin HUTSIMin lokitiedostoon, jonka avulla voitiin tarkemmin seurata mitä simuloinnin aikana tapahtui. Tiedostoon tallennettiin muun muassa HUTSIMiin saapuneet ja sieltä lähtevät tekstimuotoiset viestit. Myös tietoliikenneyhteyksien avaaminen ja sulkeminen tallennettiin lokitiedostoon.

Järjestelmän toimintavarmuutta ja viestiyhteyksien eheyttä testattiin simuloimalla mallia mahdollisimman pitkään ilman katkoksia tai muita häiriöitä. Järjestelmän eri osa-alueet testattiin erikseen. Ensin toteutettiin ajantasaisen liikennetietojärjestelmän simulointi, jonka jälkeen tarkasteltiin valo-ohjausjärjestelmän viestiyhteyksiä. Lopuksi testattiin kummankin osa-alueen toimivuus samanaikaisesti. Testauksen aikana järjestelmällä

simuloitiin yli kaksitoista tuntia. Tällöin voitiin tarkkailla järjestelmän toimivuutta sekä vilkkaaseen aikaan että hiljaisempina ajanjaksoina.

Simuloinnin ajantasaista liikennetietojärjestelmää testattiin kahdella tavalla. Ensin kuunneltiin telnet-yhteydellä Jabber-asiakas -ohjelmiston käyttämää viestiyhteyssporttia. Tarkoituksena oli tutkia toimiiko viestien saapuminen simulointilaboratorioon häiriöttä. Yhteys toimi ilman katkoksia testatun ajan, joka pisimmillään oli kolme päivää. Testauksen ajankohdalla ei ole merkitystä, sillä MDSL-yksiköt lähettävät viestejä jatkuvalla syötteellä välittämättä ilmaisimien varausasteenmuutoksista. Kun viestien lähettäminen Jabber-asiakas -ohjelmistosta oli testattu ja todettu toimivaksi, ajantasaista liikennetietoviestiyhteyttä testattiin HUTSIM-ohjelmistoon. HUTSIMissa syötettiin ajoneuvot MDSL-yksiköiden lähettämien viestien mukaisesti, ilman valo-ohjausta. Testi suoritettiin 19.–20.4.2004. Järjestelmän tiedonvälitys toimi ehyenä ennalta määritetyn 15 tunnin ajan. Simuloinnin lopuksi HUTSIM sulki viestiyhteyden oikein lähettäen Jabber-järjestelmään stop-viestit.

Kojesimulaattorin ja HUTSIMin välinen viestiyhteyden eheys testattiin ensin ilman ajoneuvoja. Testaus kesti 15 tuntia ja se tehtiin 20–21.4.2004. Testauksen ajan HUTSIM toimi ilman katkoksia, mutta kojiesimulaattorit kaatuivat ja sulkiivat tietoliikennetyhteytensä WSI-palvelimeen. Viestiyhteys TrafficSimInterface-rajapintaohjelman ja HUTSIMin välillä pysyi ehyenä. HUTSIM lähetti sekunnin välein ilmaisintilaviestejä testauksen loppuun asti rajapintaohjelmalle, joka ei kuitenkaan saanut kojiesimulaattoreilta tietoa opastinryhmien tiloista. Tästä johtuen HUTSIM ei tehnyt tilapäivityksiä opastinolioille ja liittymien valo-ohjaus pysähtyi yhteen vaiheeseen. Testauksen aikana XP-käyttäjärjestelmä oli lähettänyt virheilmoituksen, jossa varoitettiin järjestelmän alhaisesta virtuaalimuistista. Järjestelmässä oli todennäköisesti tapahtunut muistivuoto, joka aiheutti ylikuormittumista keskusyksikön kapasiteetille. Simuloinnin jälkeen tietokone oli hyvin hidas ja se täytyi käynnistää uudelleen. Hitaus johtui virtuaalimuistin ylikysynnästä, jolloin kone joutui hakemaan suurempaa muistialuetta kiintolevyiltä.

Ilmenneiden muistivuoto-ongelmien takia kojiesimulaattoreita testattiin ilman viestiyhteyttä HUTSIMiin. Testin tarkoituksena oli selvittää, aiheuttavatko liikennesimulointiohjelmiston lähettämät ilmaisintilaviestit kojiesimulaattorin rajapinnalle liikaa tietoliikennettä. Alle tunnin simuloimisen jälkeen ensimmäinen kojiesimulaattori lähetti virheilmoituksen ja kaatui. Testausta jatkettiin kahdella muulla simulaattorilla. Kojeet simuloivat kuuden tunnin ajan ongelmitta. Seuraava noin tunnin mittainen simulointi kaikilla kolmella kojeella onnistui hyvin, joten kojeet yhdistettiin jälleen HUTSIMiin ja jätettiin simuloimaan 16 tunnin ajaksi ilman liikennettä. Ohjelmistot eivät kaatuneet testauksen aika-

na. Kuitenkin, kokesimulaattoreiden rajapintaohjelma toimi hyvin hitaasti ja käyttöjärjestelmä ilmoitti jälleen vähäisestä virtuaalimuistista.

Koska järjestelmä ei kaatunut edellisen testauksen aikana, lisättiin simulointimalliin ajoneuvoliikenne. Malliin syötettiin ajoneuvoja tavallisen simuloinnin tapaan keskimääräisten liikennemäärien avulla. Simuloinnin kesto oli 15 tuntia. HUTSIM toimi testauksen ajan ja tuotti tarvittavat tulostiedostot oikein. Kokesimulaattorit puolestaan kaatuivat eivätkä toteuttaneet valo-ohjaussimulointia testauksen loppuun asti. Rajapintaohjelmisto tallensi järjestelmässä tapahtuneen tiedonvälityksen lokitiedostoon. Tekstitiedostosta ilmeni, että kokesimulaattorit olivat lopettaneet viestien lähettämisen sen jälkeen, kun HUTSIM oli lähettänyt monta ilmaisintilaviestiä hyvin nopeassa ajassa. Tämä viittaa siihen, että kokesimulaattorin ja rajapintaohjelmiston viestiyhteys katkeaa, kun rajapintaohjelman viestien vastaanottokapasiteetti ylittyy.

Kokesimulaattoreiden kaatumisjärjestys on vaihdellut simulointikohtaisesti. Esimerkiksi viimeisimmässä testauksessa ensimmäisenä kaatui koje, jonka tunnistenumero on 90010. Ennen kojeen viestiyhteyden katkeamista HUTSIM oli lähettänyt kymmenen ilmaisintilaviestiä 0,56 sekunnin aikana. Aiemmassa testissä ensimmäisenä viestiyhteyden katkaisi 90030-koje. Saatujen tietojen perusteella voidaan päätellä, että seuraavan viestin lähettävä kojeohjelmisto kaatuu, jos HUTSIM lähettää samanaikaisesti liian tiheään ilmaisintilaviestejä kojeille. Testauksen tuloksista on kerrottu Ruotsiin Peek Trafficille, jossa kokesimulaattoriohjelmisto on kehitetty. Ongelmaa ei tutkittu tarkemmin, sillä kojeohjelmiston hallinta ja kehittäminen eivät kuulu tämän tutkimuksen tavoitteisiin. Ennen kuin kyseinen viestiyhteydsvirhe korjataan, testausta ei kannata jatkaa. Jos rajapintaohjelmassa ilmennyttä vikaa ei korjata, integroitua simulointijärjestelmää ei voida käyttää alueella olevan kysynnän huipputuntien aikana.

Kokesimulaattoreiden eräs toiminnan epävarmuustekijä on TrafficSimInterfacessa oleva ikkuna, johon tallennetaan jokainen koje- ja liikennesimulaattorin välinen viesti (kts. kuva 26). Ikkuna on toteutettu niin, että sen päivityksessä kirjoitetaan ikkunassa nähtävä teksti uudelleen. Toteutus on raskas toimenpide, joka vie koneen muistia merkittävästi. Simulaattorit toimivat pidemmän jakson kaatumatta, jos ikkuna peitetään. Peek Traffic lupasi antaa tutkimuskäyttöön ohjelmistoversion, josta kyseisen ikkunan viestipäivitys voidaan lopettaa.

Uudessa kokesimulaattorin versiossa voi valita haluaako ohjelman näyttävän käyttöliittymän ikkunassa saapuvat ja lähtevät viestit. Muutoksesta huolimatta ohjelma kaatui testauksessa, mutta useimmat testausajot kestivät vähintään tunnin. Jos kokesimulaattorit toimivat vähintään puolituntia kerrallaan, simulointijärjestelmän tuloksia voidaan

käyttää liikennesuunnittelussa. Koska kokesimulaattoreiden toimintavarmuus on heikkoa, tutkimuksessa simuloidaan kerrallaan vain puolen tunnin mittaisia ajoja. Kuitenkin, ohjelmistossa on edelleen luotettavuusongelmia, joista on ilmoitettu Ruotsin Peek Traficille.

Viestien viivytykset mitattiin tekemällä ns. pingaus liikennelaboratorion tietokoneelta Tuusulassa sijaitseviin MDSL-yksiköiden IP-osoitteisiin. Pingaus tarkoittaa hyvin pienen tietopaketin lähettämistä vastaanottajalle, joka automaattisesti lähettää paketin takaisin. Oheisessa taulukossa on järjestelmässä edestakaiseen tiedonsiirtoon kuluva aika (*round-trip time*). Tuloksia tarkastellessa on hyvä huomioda, että ping-paketti on hyvin pieni. Jos lähetetään suuria tietomääriä, tieto pakataan pienempiin paketteihin. Tällöin ehyt tieto ei ole perillä ennen kuin kaikki paketit ovat saapuneet, jolloin tiedonsiirtonopeus saattaa olla pingausta hitaampi. Järjestelmässä yhden lähetettävän viestin koko on noin 100 ascii-merkkiä eli noin 800 bittiä. Kun viestiin lisätään protokollien edellyttämät kehykset, yhden siirrettävän tietomäärän koko on noin yksi kilobitti, joka ei ole merkittävän suuri nykyiselle tiedonsiirtotekniikalle tai tietoverkolle.

Taulukko 9. Järjestelmässä tiedonsiirtoon kuluva aika (RTT).

Tuusulan terveysasema (gateway)	Vanha tuusulantie	Itäinen Ohikulkutie	Haukantie
[ms]	[ms]	[ms]	[ms]
24,2	27,3	29,8	32,3

Testialueen todellista valo-ohjausta toteuttavat ELC-3 -kojeet. Kojien ja MDSL-yksiköiden välisen viestinnän lähetysnopeuteen vaikuttavat kojeen muu toiminta ja viestien koko. Jos liittymässä on monta opastinryhmää ja useita ilmaisimia, viestinelähetyskapasiteetti pienenee. Lähetysnopeus hidastuu myös silloin, kun lähetettävien viestien koko on suuri. Suunnitteluvaiheessa huomioitiin viestien koosta aiheutuvat tietoliikenneongelmat, joten niiden rakenne ja sisältö on suunniteltu kuormittavan mahdollisimman vähän tietoliikenneyhteyttä. Testialueen liittymissä viestin lähetysnopeus on keskimäärin 7–10 viestiä sekunnissa. MDSL-laitteisto pystyy lähettämään viestejä useammin, mutta liian tiheä viestien lähetys saattaa haitata kojeiden ja opastinryhmien välistä toimintaa. Lähetysnopeus vaikuttaa tarkkuuteen, jolla saadaan tietoa mallinnettavan alueen liikennemääristä. Ajoneuvojen välillä on oltava vähintään yksi viesti, jossa ilmaisimien ei ole varattu, jotta simulointijärjestelmä syöttää seuraavan ajoneuvon malliin. Seitsemän viestiä sekunnissa tarkoittaa, että viesti lähetetään joka 0,143 sekunti, joten ajoneuvojen nettoaikavälin on oltava vähintään 0,286 sekuntia. Tällöin nopeudesta riippuen raja-arvo vähimmäisnettomatkatavälille on 3,2–5,6 metriä. Taulukossa 10 on vähimmäisnettomatkatavälit eri nopeuksille.

Taulukko 10. Mallinnettavan alueen nettoaikaväli ja -matkaväli.

nopeus	[km/h]	70	60	50	40
nopeus	[m/s]	19,4	16,7	13,9	11,1
nettoaikaväli	[s]	0,3	0,3	0,3	0,3
nettomatkaikaväli	[m]	5,6	4,8	4,0	3,2

Ajantasaisen järjestelmän tuottama liikennemäärätiedon todenmukaisuutta testattiin videokuvauksen avulla. Testaus toteutettiin tiistaina 15.6.2004. Kuvaus aloitettiin ilta-päivällä kello kolme ja lopetettiin kuuden maissa. Videokameralla kuvattiin mallinnettavan alueen kahta ilmaisinta, jotka tuottavat simulointimallin eteläisimpien syöttö pisteiden liikennetiedot. Samanaikaisesti liikennelaboratoriossa simuloitiin kehitetyllä järjestelmällä ja tallennettiin saapuvat ja lähtevät viestit lokitiedostoon. Todellista liikennemäärää verrattiin simuloinnin tuloksena saatuun syötettyjen ajoneuvojen määrään. Kokonaismäärien lisäksi tulosten analyysissä verrattiin aikojen perusteella kuinka tarkasti eri liikennetilanteissa simulointijärjestelmä toteuttaa todellista liikennemäärää. Vertailtu lyhin aikajakso on minuutti. Tarkat tulokset testauksesta on liitteessä 1. Taulukossa 11 on vertailtu puolen tunnin liikennemääriä. Video-sarake kuvaa todellista liikennemäärää ja hutsim-sarake malliin syötettyjen ajoneuvojen määrää. Erotuksessa on vähennetty videon liikennemäärästä HUTSIMin syöttämä liikennemäärä. Kaistakohtainen virhe on laskettu jakamalla kokonaiserotus videon kokonaisliikennemäärällä. Suuntakohtaisessa virheessä on yhdistetty kaistojen liikennemäärät ja laskettu erotuksen suhde videon liikennemäärään.

Taulukko 11. Järjestelmän liikennemäärän testauksen tulokset.

aika	oikeakaista			vasenkaista		
[min]	video	hutsim	erotus	video	hutsim	erotus
0-30	520	507	13	368	381	-13
30-60	604	587	17	526	529	-3
60-90	641	625	16	644	633	11
90-120	669	658	11	562	57	-10
summa	2434	2377	57	2100	2115	-15
virhe	2,34 %			-0,71 %		
virhe yhteensä		42 ajon.	→ 0,93 %			

Videokuvasta laskettujen ajoneuvojen kaistan määrittäminen oli joissain tilanteissa epäselvä, mistä johtuu vasemman kaistan vähäisempi todellisten ajoneuvojen määrä. Tämä inhimillinen kaistavirhe voidaan poistaa laskemalla kummankin kaistan ajoneuvot yhteensä, jolloin testauksen aikana todellisia ajoneuvoja oli 42 enemmän kuin mitä HUTSIM syötti malliin. Kun erotusta verrataan todelliseen liikennemäärään, järjestel-

män liikennemäärän syöttövirheeksi saadaan 0,93 prosenttia. Virheprosentti voi johtua järjestelmästä riippumattomista ilmaisineläskentävirheistä. Videon kello muutettiin simulointijärjestelmän kanssa samaan aikaan manuaalisesti. Järjestelmien kellon ajoissa voi olla alle sekunnin ero, sillä järjestelmien kelloja ei saatu tarkemmin tahdistettua.

Testauksen aikana mallinnettavalta alueelta kerättiin myös Tiehallinnon liikennetietojärjestelmään ilmaisintietoa. Tilastoista ei saa yksittäistä ajoneuvotietoa, vaan liikennemäärät on tilastoitu tietyn ajanjakson keskimäärinä. Lyhin ajanjakso on kaksi minuuttia. Usean peräkkäisen lyhyen aikajaksojen välillä ei ole liikennemäärävaihteluja, joten lyhyet aikavälitiedot on todennäköisesti laskettu pidemmän aikavälin keskiarvosta. Ilmaisinkohtaista kahden minuutin keskiarvotietoa verrattiin videokuvasta saatuaan liikennemäärään sekä simulointimalliin syötettyihin liikennemääriin. Tuloksissa on otettava huomioon, ettei Tiehallinnon järjestelmän kelloa ole mitenkään synkronoitu testausjärjestelmän kellon kanssa, joten ajassa voi olla yli kahden minuutin heittoja.

Taulukko 12. Tiehallinnon tilaston, järjestelmään syötettävien liikennemäärien ja todellisten liikennemäärien vertailun tulokset.

aika	oikeakaista			vasenkaista		
[min]	tiehallinto	video	hutsim	tiehallinto	video	hutsim
0-30	592	534	522	473	368	377
30-60	604	609	588	596	543	542
60-90	647	646	633	631	655	654
90-120	521	584	572	475	493	499
summa	2364	2373	2315	2175	2059	2072
virhe	-0,4 %		-2,5 %	6 %		0,6 %
tiehallinnon virhe yhteensä			2,4 %			

Taulukon 11 liikennemäärät on laskettu hieman eri aikaan kuin taulukossa 12, sillä Tiehallinnon järjestelmän liikennemääriin vertailtaessa laskenta on aloitettava parillisen minuutin alusta. Testauksessa ilmenevät erot voivat osittain johtua järjestelmissä olevien kellojen eriaikaisuudesta. Tilastojen mukaan sekä simulointijärjestelmä että Tiehallinnon liikenneläskentäjärjestelmä laskevat oikeanpuoleisen kaistan liikennemäärän todellisuutta vähäisemmäksi ja vasemman puoleisen kaistan suuremmaksi. Tiehallinnon läskentäjärjestelmän tilastoissa vasemmalla kaistalla on kuusi prosenttia todellista liikennemäärää enemmän ajoneuvoja, oikeanpuoleisella kaistalla on lähes oikea liikennemäärä. Koska myös tässä vertailussa videonkatsomisesta aiheutuvien inhimillisten virheiden mahdollisuus on olemassa, kaistojen liikennemäärät laskettiin yhteen ja saatiin tilastoinnin yhteisvirhe erotuksen ja todellisen liikennemäärän suhteesta. Tiehallinnon järjestelmä tilastoi 2,4 prosenttia todellista liikennemäärää suuremman arvon.

5.7. Järjestelmän käyttö

Liikenteen simuloiminen kehitetyllä järjestelmällä vaatii kaksi tietokonetta, joissa toisessa on Linux- ja toisessa XP-käyttöjärjestelmät. Järjestelmä vaatii myös Internet-yhteyden sekä edellä esitetyt simulointiohjelmistot ja palvelimet. HUTSIM toimii lähes tavalliseen tapaan. Vuonna 1996 julkaistussa HUTSIMin käyttöohjeissa on yksityiskohdaisesti selvitetty tarvittavat alkutoimenpiteet ja tiedostot ennen simuloimista (Sane, Kosonen 1996). Integroidun simulointijärjestelmän takia lisättyjen ominaisuuksien käyttöohjeet ovat *liitteenä 2*, jossa on myös tarkemmat ohjeet kokesimulaattorin käyttämiselle. Kokesimulaattori toimii samalla tavalla kuin todellinen EC-1 koje, joten lisätietoa ohjelmiston käytöstä voi lukea myös Peek Traffic -kojeiden käsikirjoista (Peek Traffic 2002, Peek Traffic 2003b). Maastossa sijaitsevat laitteet toimivat HUTSIMista lähetettyjen viestien avulla. Järjestelmän käyttäjän ei tarvitse huolehtia MDSL-laitteiden hallinnasta, sillä se tapahtuu automaattisesti HUTSIMin avulla.

Ennen kuin kehitetyllä järjestelmällä voidaan aloittaa simuloiminen, käyttäjän on toteutettava HUTSIMiin liikenneverkkomalli ja tarvittavat tekstitiedostot sekä kytkettävä kokesimulaattorit WSI-palvelimen kautta TrafficSimInterface-ohjelmaan. Telnet-yhteydellä voidaan tarkistaa tiedonvälityksen toimivuus mallinnettavan alueen MDSL-laitteista käyttäjän PC:lle. Ajantasaisen liikennetietojärjestelmän palvelimet pidetään koko ajan päällä, joten Linux-konetta ei saa sammuttaa ajojen välillä. Koneen verkkoasetukset saattavat muuttua sammutuksen yhteydessä, mikä voi estää seuraavalla kerralla ehyn viestiyhteyden muodostamisen. Kun kokesimulaattorijärjestelmä on valmis yhdistettäväksi HUTSIMiin, TrafficSimInterfacen avulla voidaan aloittaa ja lopettaa opastintilaviestien lähettäminen painamalla start- ja stop-painikkeita ohjelman käyttöliittymässä. HUTSIMilla voidaan aloittaa liikenteen simuloiminen, kun ohjelma on käynnistymisen jälkeen alustanut muuttujat alkuarvoilla, avannut tietoliikenneyhteyden WSI-palvelimeen ja mallin opastinoliot ovat harmaat graafisessa käyttöliittymässä.

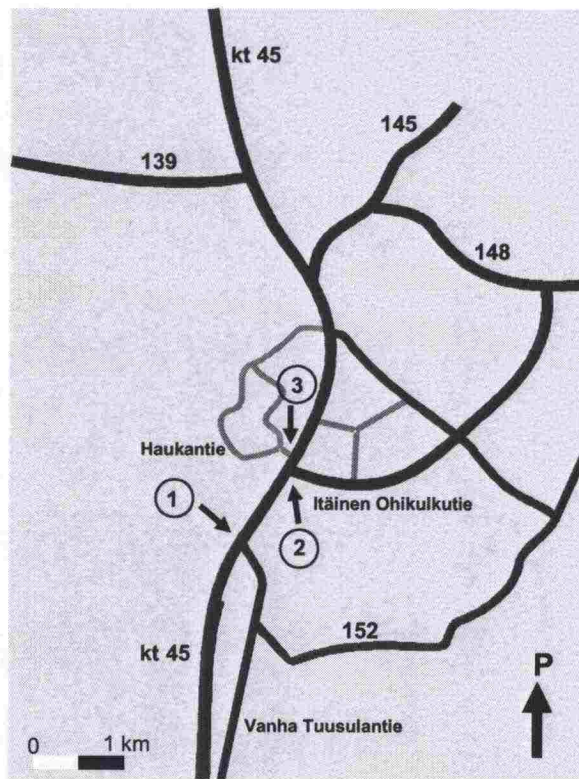
Simuloiminen aloitetaan lähettämällä HUTSIMista ajantasaiseen liikennetietojärjestelmään start-viesti ja simuloiminen päätetään stop-viestiin. HUTSIM lähettää automaattisesti stop-viestin, kun simuloiminen keskeytetään tai se päättyy määritetyn aikajakson jälkeen. Järjestelmän muita ohjelmistoja tai palvelimia ei saa sulkea ennen HUTSIM-ohjelmiston sulkemista. Muuten HUTSIM voi jäädä jumiin tietoyhteyden mennessä poikki ilman että ohjelma olisi varautunut siihen. Simuloimisen jälkeen HUTSIMin muodostamat tulokset ovat suunnittelijan käytettävissä, kuten myös kokesimulaattorin toimintaa ohjaavat elc.dat -tiedostot.

6. TUUSULAN TESTIALUE

6.1. Testialueen kuvaus

6.1.1. Alueen sijainti ja liikennemäärät

Testialueeksi valittiin Tuusulassa kantatiellä 45 eli Tuusulanväylällä sijaitsevat kolme peräkkäistä valo-ohjauksista liittymää. Ne ovat kolmihaaraliittymiä. Eteläisimmässä Vanha Tuusulantie (pt 11556) liittyy päätiehen, seuraavassa Itäinen Ohikulkutie (pt 11466) ja pohjoisimmassa Haukantie (katu) liittyy Tuusulanväylään (Kuva 32). Alueen eteläisimmän ja keskimmäisen liittymän välimatka on noin kilometri. Keskimmäisestä liittymästä pohjoisimpaan on alle 200 metrin välimatka. Testialue sijaitsee noin 30 kilometriä Helsingistä pohjoiseen.



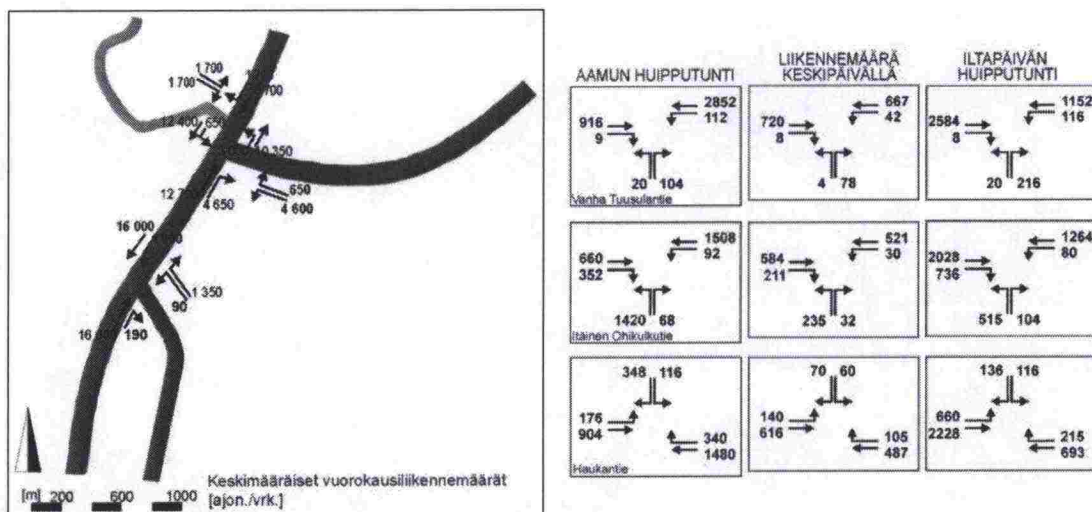
Kuva 32. Testialueen liittymät kartalla.

Testialueen liikennemäärät laskettiin Tiehallinnon liikennemäärälaskentajärjestelmän avulla. Alueen ilmaisimien laskemat liikennemäärät tallennetaan järjestelmään tunnin ja 15 minuutin keskiarvoina. Keskimääräiset vuorokausiliikennemäärät ja päiväliikenne on laskettu tunnin keskiarvoista. Huipputuntien mitoittavat liikennemäärät on laskettu 15 minuutin keskiarvoista (kuva 33). Mittausajankohta oli 22–26.3.2004.

Itäiseltä Ohikulkutieltä etelään kääntyvien kaistoilla on kahden kaistan ylittävä laskenta ilmaisin. Muuten alueen laskentailmaisimet ovat kaistakohtaisia. Kahden kaistan ilmaisimen laskemia liikennemääriä on korjattu. Ruuhka-aikaan on oletettu, että ilmaisin laskee vain 60 prosenttia liikenteestä. Muuten oletetaan sen laskevan 80 prosenttia todellisesta liikennemäärästä. Osuudet perustuvat mittauksiin, jossa on sekä useamman kaistan että kaistakohtainen ilmaisin.

Vuorokausiliikennemäärät laskettiin viiden päivän keskiarvona. Alueen suurin liikennemäärä havaittiin ensimmäisen liittymän eteläpuolella. Siellä oli keskimäärin 16 000 ajoneuvoa vuorokaudessa. Vastaavasti testialueen pohjoisreunalla liikennemäärä oli keskimäärin 10 700 ajoneuvoa vuorokaudessa. Sivusuunnista Itäisellä Ohikulkutiellä on vilkkain liikenne erityisesti Helsingin suuntaan. Haukantien liittymästä kulkee alle 2000 ajoneuvoa vuorokaudessa sekä pohjoiseen että etelään. Vanhan Tuusulantien liikennemäärät ovat testialueen vähäisimmät. Alueen liikennemäärät on sijoitettu kartalle kuvassa 33.

Kuvan 33 huipputuntien mitoitustiikennemäärät laskettiin 15 minuutin maksimiliikennemääristä, jotka kerrottiin neljällä. Liikennemäärät mitattiin keskiviikkona 24.3.2004. Päiväliikenne on laskettu kello 12–13:00 väliseltä ajalta viiden päivän keskiarvoksi.



Kuva 33. Testialueen liikennemäärät.

6.1.2. Infrastruktuurin ja valo-ohjauksen kuvaus

Nykyinen infrastruktuuri on kuvattu testialueen liittymien fyysisten mittojen ja mallinnuksen kannalta tärkeimpien valo-ohjauslaitteiden avulla. Alue kuvataan liittymäkohtaisesti. Liittymiä kuvaavat kartat on piirretty liikennesuunnitelmakarttojen (1986) avulla.

Ryhmittymiskaistojen pituudet on mitattu kaistan alusta pysäytysviivalle. Liittymien kaistoille, ilmaisimille ja opastinryhmille on annettu yksilöivät tunnuksot, joihin viitataan tekstissä. Kirjaimet ovat liittymäkohtaisia. Jokaisella opastinryhmällä on oma kirjaintunus, joka on annettu myös ryhmän ohjaamille kaistoille. Opastinryhmän ohjaamat osatulosuunnan kaistat on erotettu toisistaan alaindeksillä. Testialueen liittymissä ei ole suojateitä, vaan kevyenliikenteen tien ylitykset on toteutettu eritasossa.

Valo-ohjauksen parametrien arvot on saatu laitetoimittajalta. Niiden avulla on muodostettu kuvaus valo-ohjausten toiminnasta. Valo-ohjauksesta selvitetään opastinryhmien vaiheet, valo-ohjauksen toiminnan kannalta tärkeimpien perusparametrien arvot, ajoituskaaviot sekä kahden pohjoisemman liittymän välinen yhteenkytkentäkaavio. Esitettyjen vaihekaavioiden lähteenä on käytetty Tiehallinnolta saatuja vuonna 1986 tehtyjä liikennevalosuunnitelmia, josta ilmenee mihin päävaiheeseen opastinryhmät kuuluvat. Myös kojeisiin ohjelmoituja parametrien arvoja on käytetty vaihekaavioiden lähteenä. Valojen toiminnan kannalta tärkeimmät opastinryhmäparametrit ovat minimivihreän, maksimivihreän, liikennetieto-ohjatun vihreän lopetusajan ja keltaisen kesto. Myös vihreän aloitus ja lopetustapa, maksimiajan laskennan käynnistystapa sekä lepotila on selvitetty liittymäkohtaisesti seuraavissa kappaleissa. Yhteenkytkentäkaavio perustuu vuoden 1986 liikennevalosuunnitelmaan.

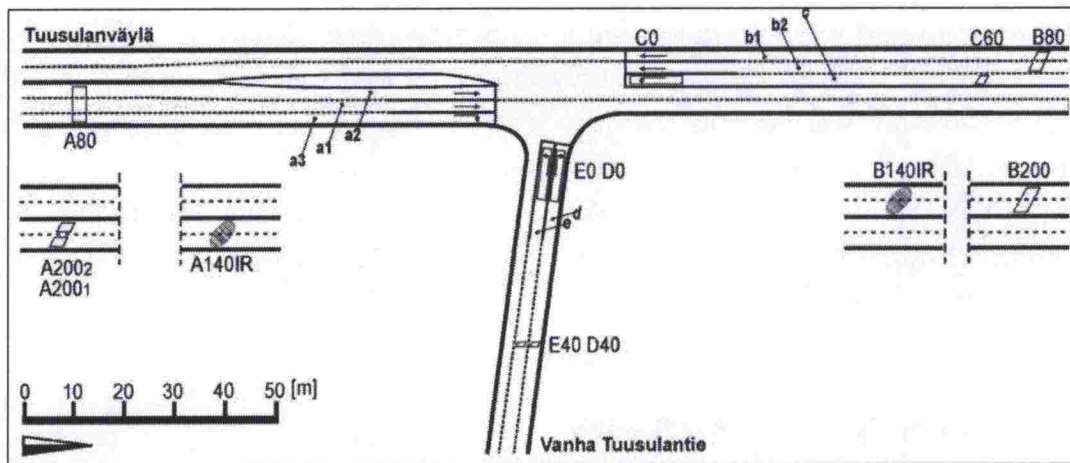
6.1.3. Vanhan Tuusulantien liittymä

Testialueen eteläisimmässä liittymässä pääsuunnan eli Tuusulanväylän kummallakin tulosuunnalla on kaksi kaistaa ja kääntyvien ryhmittymiskaistat. Kaistajärjestelyt on esitetty *kuvassa 34*. Oikealle kääntyvien ryhmittymiskaista (a_1) on 139 metriä ja vasemmalle kääntyvien ryhmittymiskaista (c) 116 metriä pitkä. Vanhalla Tuusulantiellä on erilliset kaistat vasemmalle ja oikealle kääntyville ajoneuvoille (d,e).

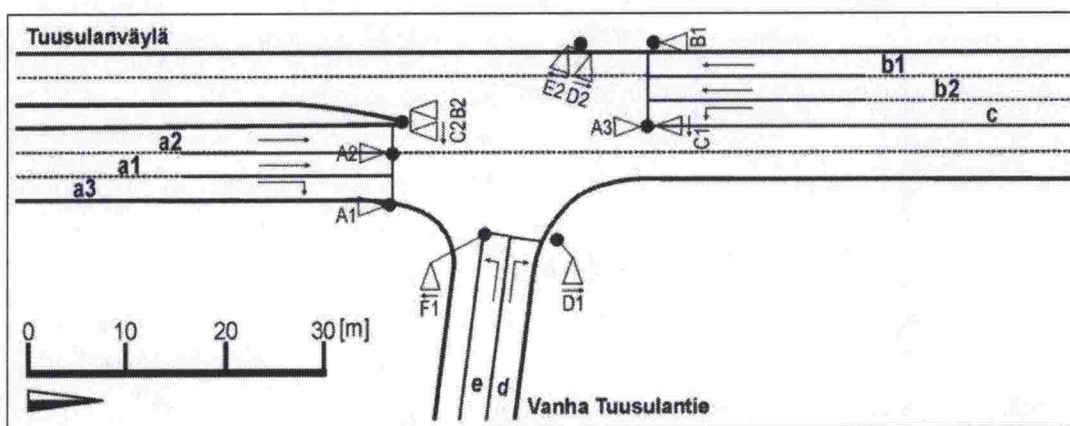
Liittymässä on toteutettu erillisvalo-ohjaus. Opastinryhmät on esitetty liittymän lähikuvassa (*kuva 35*). Päätiellä on kolme opastinryhmää, etelästä pohjoiseen, pohjoisesta etelään ja pohjoisesta itään. Vasemmalle kääntyvien opastinryhmässä on nuoliopastin. Toisto-opastimet sijaitsevat liittymän vastakkaisella puolella. Eteläisen tulosuunnan opastinryhmällä (A) on myös toisto-opastin porttaalissa. Sivusuunnan kummallakin kaistalla on oma opastinryhmä, jossa on nuoliopastin. Sivusuunnan toisto-opastimet sijaitsevat Tuusulanväylän länsipuolella.

Tuusulanväylän kummankin tulosuunnan suoraan menevillä kaistoilla (a,b) on kolme ilmaisinta, joiden etäisyydet ovat 80, 140 ja 200 metriä pysäytysviivasta. Niiden tunnuksot määräytyvät etäisyyden ja tulosuunnan kirjaimen mukaan. 140 metrin päässä

olevat ilmaisimet ovat infrapunailmaisimia, muut ovat induktiosilmukoita. Eteläisen tulo-suunnan kauimmaisiet ilmaisinsilmukat ($A200_1$, $A200_2$) ovat kaistakohtaisia. Muuten pääsuunnan suoraan jatkavien kaistojen ilmaisimet on jaettu vähintään kahdelle kaistalle. Päätien oikealle kääntyvien ajoneuvojen vihreän pidennys toteutetaan jaetun A80 ilmaisimen avulla. Vasemmalle kääntyvien ryhmittymiskaistalla on omat ilmaisimet. Kaista on ainoa pääsuunnan kaistoista, jolla on läsnäoloilmaisim. Kaistan kulkuilmaisim on sijoitettu 60 metrin päähän pysäytysviivasta. Sivusuunnan kaistoille on sijoitettu läsnäoloilmaisim pysäytysviivan läheisyyteen ja kulkuilmaisim noin 40 metrin päähän pysäytysviivasta. Kuvassa 34 on esitetty liittymän ilmaisinjärjestelyt. Osa Tuusulanväylällä sijaitsevista ilmaisimista on esitetty erillisinä kuvina, jotta kartan mittakaava ei muodostu liian pieneksi.



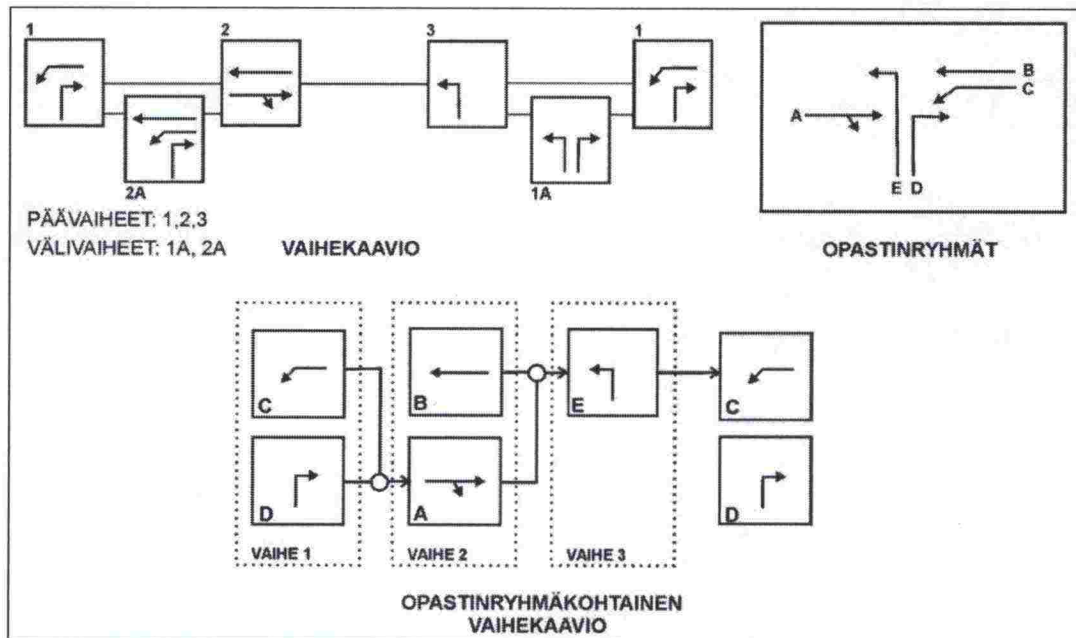
Kuva 34. Testialueen eteläisimmän liittymän Tuusulanväylä–Vanha Tuusulantie ilmaisim- ja kaistajärjestelyt.



Kuva 35. Vanhan Tuusulantien liittymän opastinryhmäjärjestelyt.

Vanhan Tuusulantien liittymän opastinryhmäohjauksessa on kolme päävaihetta ja yksi mahdollinen välivaihe. Kuvan 36 vaihekaaviossa ensimmäisessä päävaiheessa ovat

opastinryhmät C ja D. Toisessa päävaiheessa ovat pääsuunnan suoraan jatkavien opastinryhmät (A, B). Pääsuunnalta oikealle kääntyvillä (a_3) ei ole omaa opastinryhmää, joten ne kuuluvat myös toiseen vaiheeseen. Kolmannessa päävaiheessa on sivusuunnalta vasemmalle kääntyvien opastinryhmä (E). Välivaihe 1A mahdollistaa opastinryhmän D vaihtuvan vihreäksi jo päävaiheen kolme aikana. Välivaiheen 2A vuoksi opastinryhmä B voi pyynnöstä vaihtua vihreäksi jo päävaiheen yksi aikana.



Kuva 36. Vanhan Tuusulantien valo-ohjauksen vaihekaavio.

Vanhan Tuusulantien liittymän valo-ohjauksessa ei ole kiinteää kiertoaikaa, sillä valot toteuttavat liikennetiedon mukaista erillisohjausta. Kaikilla opastinryhmillä on vihreän aloitustapana oma pyyntö. Opastinryhmät C ja D aiheuttavat toisilleen etuisuusaikaa, kun lopettavat konfliktiryhmän vihreän, jolloin myös toinen voi pyynnöstä vaihtua vihreäksi. Opastinryhmien maksimivihreän laskenta aloitetaan konfliktiryhmän pyynnöstä vihreän aikana. Vihreän lopetus tapahtuu kaikissa suunnissa konfliktiryhmän käynnistyessä eli opastinryhmä seuraa vihreänä, jos toinen opastinryhmä pyynnöllä pidentää omaa vihreää. Opastinryhmällä A on liikenneohjattu vihreän lopetusviive, jonka maksim aika on kahdeksan sekuntia. Pääsuunnalla on toteutettu vihreä lepotila. Taulukossa 13 on lueteltu osa valo-ohjauksessa toteutettavien opastintilojen ajallisista kestoista. Konfliktiryhmien väliset suoja-ajat ovat taulukossa 14. Matriisissa on kuvattu sarakkeissa vihreälle vaihtuvan opastinryhmän ja riveillä sen konfliktiryhmien väliset suoja-ajat.

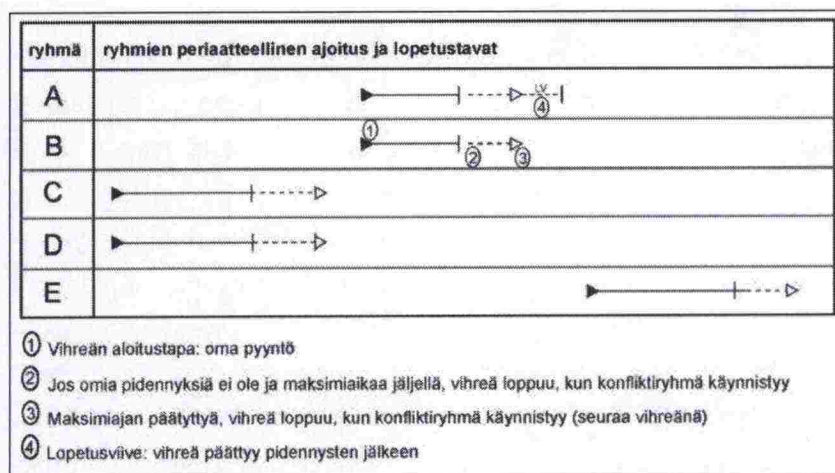
Taulukko 13. Opastintilojen ajalliset kestot [sekuntia].

op. ryhmät	keltainen	min. vihreä	max. vihreä	vihreän lopetusviive
A	5	6	60	8,0
B	5	6	60	-
C	3	5	20	-
D	3	5	40	-
E	3	5	20	-

Taulukko 14. Konfliktiryhmien väliset vaihtumisajat [sekuntia].

ALKAVA OPASTINRYHMÄ						
LOPETTAVA		A	B	C	D	E
	A			7	7	7
	B					7
	C	5				4
	D	4				
	E	5	6	5		

Yleensä erillis- ja liikenneohjatuista valo-ohjelmista esitetään ryhmien periaatteellinen ajoitus ja lopetustavat. Ohessa on kuva Vanhan Tuusulantien opastinryhmien toimintatavoista.



Kuva 37. Opastinryhmien periaatteellinen toiminta Vanhan Tuusulantien liittymässä (merkintöjen lähde: Tiehallinto 1996).

Pääsuunnan turvallisuutta on parannettu valinta-alueen tyhjennystoiminnolla, joka toteutetaan valinta-alueella sijaitsevien ilmaisimien (A/B 80 ja A/B 140IR) aiheuttamien

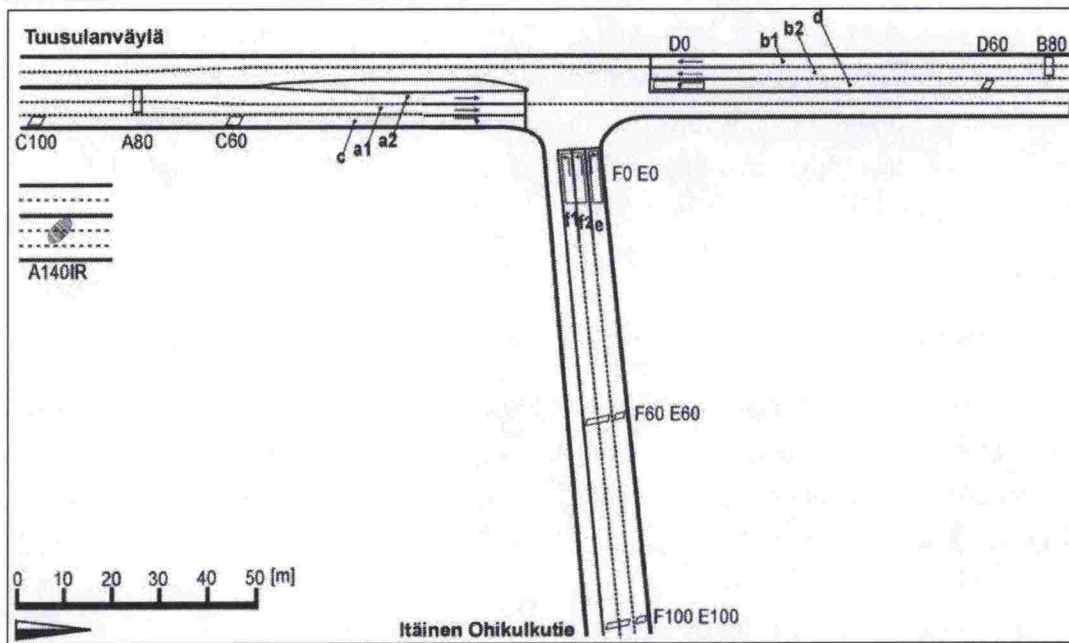
vihreän pidennysten avulla. Sen lisäksi pääsuunnan opastinryhmät (A, B) toteuttavat vihreän alkupidennystoiminnon kauimmaisten (A200, B200) ilmaisimien avulla. Sujuvuutta on parannettu muuttuvalla minimivihreällä. Minivihreän enimmäiskesto suoraan jatkavilla ryhmillä (A, B) on 12 sekuntia ja kääntyvien sekä sivusuunnan ryhmillä (C, D, E) kahdeksan sekuntia.

6.1.4. Itäisen Ohikulkutien liittymä

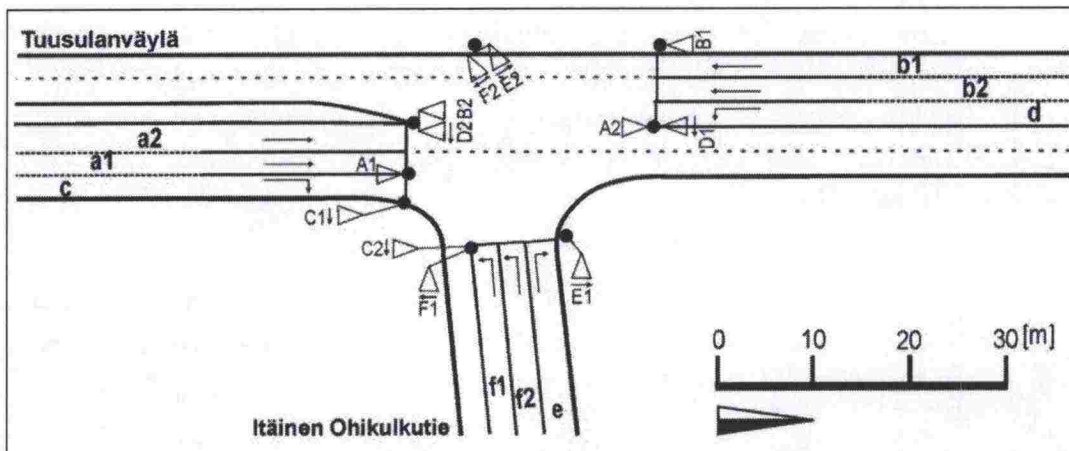
Testialueen keskimmaisessä eli Itäisen Ohikulkutien liittymässä päätien kaistajärjestelyt ovat samanlaiset kuin Vanhan Tuusulantien liittymässä. Järjestelyt on esitetty kuvassa 38. Vasemmalle kääntyvien ryhmittymiskaistan (d) pituus on 61 metriä. Seuraava liittymä pohjoisessa on 180 metrin päässä Itäisen Ohikulkutien liittymästä. Oikealle kääntyvien ryhmittymiskaistan (c) pituus on 167 metriä. Itäisellä Ohikulkutiellä etelään kääntyville ajoneuvoille on kaksi kaistaa (f) ja pohjoiseen kääntyville yksi (e).

Itäisen Ohikulkutien liittymässä on yhteensä kuusi opastinryhmää, joista neljä on osoitettu päätien liikenteelle. Päätiellä etelästä ja pohjoisesta itään kääntyville ajoneuvoille on nuoliopastimet. Sivusuunnalla on opastimet vasemmalle ja oikealle kääntyville ajoneuvoille. Etelästä itään kääntyvien toisto-opastin on sijoitettu sivusuunnan pysäytysviivalle. Muuten toisto-opastimet on sijoitettu samalla tavalla kuin Vanhan Tuusulantien liittymässä eli pääopastimesta katsottuna liittymäalueen toisella puolella. Kuvassa 39 on esitetty Itäisen Ohikulkutien liittymän opastinjärjestelyt.

Päätien kulkuilmaisimet on sijoitettu 80 metrin etäisyydelle pysäytysviivasta (A80, B80). Eteläiselle tulosuunnalle on sijoitettu liittymän ainoa infrapunailmaisin 140 metrin päähän pysäytysviivasta (A140IR). Oikealle kääntyvien ryhmittymiskaistalla on omat ilmaisimet. Ne on sijoitettu 60 ja 100 metrin päähän pysäytysviivasta (C60, C100). Vasemmalle kääntyvien ryhmittymiskaistalla on läsnäoloilmaisin (D0) sekä kulkuilmaisin, jonka etäisyys pysäytysviivasta on 35 metriä (D35). Itäisellä Ohikulkutiellä vasempaan kääntymiskaistoilla on yhteiset ilmaisimet. Läsnäoloilmaisimet on sijoitettu pysäytysviivan läheisyyteen (E0, F0) sekä kulkuilmaisimet 60 ja 100 metrin päähän pysäytysviivasta (E60, E100, F60, F100). Liittymän ilmaisintyypit ja niiden paikat on esitetty kuvassa 38.



Kuva 38. Testialueen keskimmäisen liittymän Tuusulanväylä–Itäinen Ohikulkutie ilmais- ja kaistajärjestelyt.

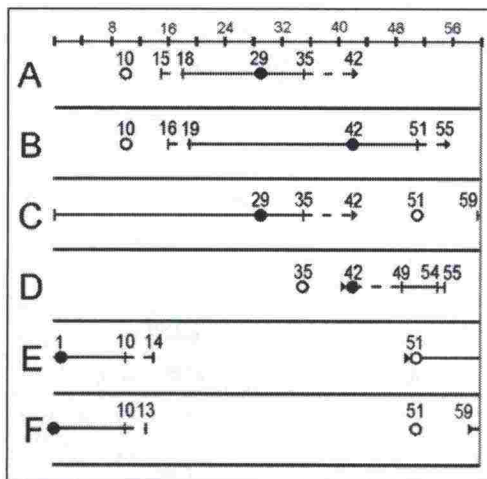


Kuva 39. Itäisen Ohikulkutien liittymän opastinryhmäjärjestelyt.

Liikennevalot toteuttavat kolmea valo-ohjelmaa, joista kaksi on yhteenkytkentäohjelmia. Arkisin kello 6:00–15:00 ja 18:00–21:00 sekä viikonloppuisin kello 6:00–20:00 välisenä aikana on käytössä 60 sekunnin yhteenkytkentäohjelma (ohjelma 2). Arki-iltapäivisin (15:00–18:00) toteutetaan 90 sekunnin yhteenkytkentäohjelmaa (ohjelma 3). Yöaikaan valo-ohjaus on toteutettu erillisohjauksena (ohjelma 1). Itäisen Ohikulkutien liittymästä alkaa Tuusulanväylän yhtenäinen valo-ohjaus, johon on yhdistetty myös neljä seuraavaa valo-ohjauksista liittymää pohjoiseen mentäessä. Kaikissa liittymissä on kolme valo-ohjelmaa, joiden toteutusajankohdat ovat samat kuin Itäisen Ohikulkutien liikennevaloissa.

Yhteenkytkennässä valo-ohjelman vihreän pituuden ja esiintymisajankohdan vaihtelumahdollisuudet ovat erillisohjausta rajoitetumpia. Vihreän pituutta voidaan säädellä ilmaisimien avulla, kunhan pituuden vaihtelut eivät katkaise väylän valo-ohjelmien yhtenäistä vihreää aaltoa. Liittymässä voi syntyä tilanteita, joissa tulosuunnan opastimia pidetään vihreällä, vaikka opastinryhmällä ei ole vihreän pyyntöä ja vihreän lopettaminen mahdollistaisi konfliktiryhmän vaihtumisen vihreäksi (Tiehallinto 1996). Opastinryhmien vihreän esiintyminen kierron aikana ja vihreän pituuden mahdollinen vaihtelu esitetään ajoituskaavion avulla.

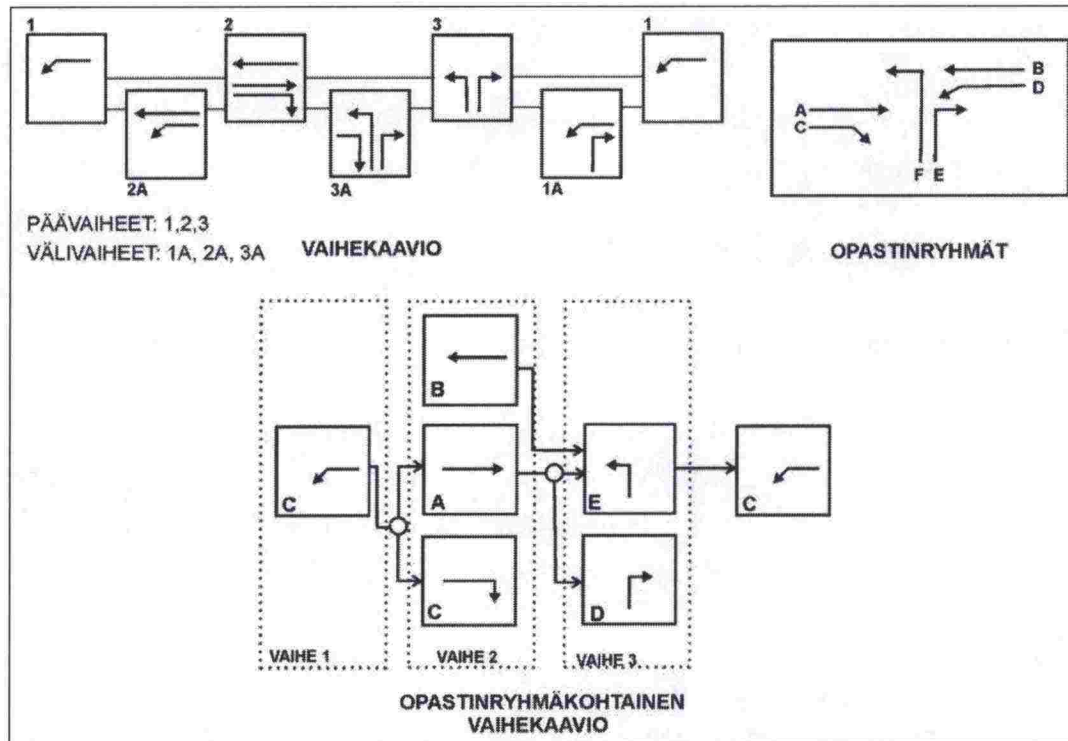
Itäisen Ohikulkutien liittymän ajoituskaavio on tehty ohjelman 2 mukaan (kuva 40). Se ohjaa päivisin pisimpään kojeita ja siten on merkittävin liittymän sujuvuuden ja liikenneturvallisuuden kannalta. Ajoituskaavio on Tiehallinnon (1996) ohjeiden mukainen. Kaaviossa yhtenäinen viiva osoittaa ajanjaksoa, jolloin opastinryhmä näyttää vihreää aina, kun ryhmä on saanut vihreän pyynnön. Katkoviivan aikana opastinryhmä voi näyttää vihreää, jos konfliktiryhmillä ei ole vihreän pidennyksiä (ennen yhtenäistä viivaa) tai ilmenee omia pidennyksiä (yhtenäisen viivan jälkeen). Rengas merkitsee vihreän aloituslupaa ja musta pallo luvan poistamista. Liittymän opastinryhmillä vihreä käynnistyy omasta pyynnöstä. Pääsuunnalla vihreän aloitustapana on kiinteä pyyntö ja vihreän lopetus tapahtuu konfliktiryhmän käynnistyessä. Muilla ryhmillä vihreän pyyntö tulee ilmaisimelta ja vihreä lopetetaan ilman lisäehtoja.



Kuva 40. Ohjelman 2 mukainen ajoituskaavio Itäisen Ohikulkutien liittymässä.

Itäisen Ohikulkutien liittymän erillisohjauksessa (ohjelma 1) on kolme päävaihetta ja kolme mahdollista välivaihetta. Kuvan 41 vaihekaaviossa ensimmäisessä päävaiheessa on pääsuunnalta vasempaan kääntyvien opastinryhmä (D). Toisessa päävaiheessa ovat pääsuunnan muut opastinryhmät (A, B C). Kolmannessa päävaiheessa ovat sivusuunnan opastinryhmät (E, F). Ohjaus on suunniteltu siten, että opastinryhmä E voi

jäää vihreälle myös seuraavan päävaiheen ajaksi. Välivaihe 1A mahdollistaa vihreän jatkumisen. Myös opastinryhmä B voi näyttää vihreää jo ensimmäisessä päävaiheessa. Tämän mahdollistaa välivaihe 2A. Opastinryhmät B, D ja E voivat saada samanaikaisesti vihreää, vaikka kyseistä välivaihetta ei ole esitetty vaihekaaviossa. Pääsuunnalta voi kääntyä oikealle myös kolmannen päävaiheen aikana, mikä on toteutettu välivaiheena 3A.



Kuva 41. Itäisen Ohikulkutien valo-ohjauksen vaihekaavio (erillisohjaus).

Erillisohjauksessa opastinryhmien vihreän aloitustapa on oma pyyntö ja se tulee ilmaisimelta. Opastinryhmien maksimivihreän laskenta aloitetaan vihreän aikana konfliktiryhmän pyynnöstä. Opastinryhmien vihreän lopetus tapahtuu konfliktiryhmän käynnistyessä. Taulukossa 15 on esitetty erillisohjauksessa toteutettavien opastintilojen ajallisia kestoja opastinryhmittäin. Taulukossa 16 on suoja-ajat matriisimuodossa esitettyinä. Eri valo-ohjelmissa on käytetty samoja suoja-aikoja.

Taulukko 15. Ohjelman 1 toteuttama opastintilojen ajalliset kestot [sekuntia].

op. ryhmät	keltainen	min. vihreä	max. vihreä
A	5	6	60
B	5	6	60
C	5	6	60
D	3	5	20
E	3	5	40
F	3	5	20

Taulukko 16. Konfliktiryhmien väliset suoja-ajat [sekuntia].

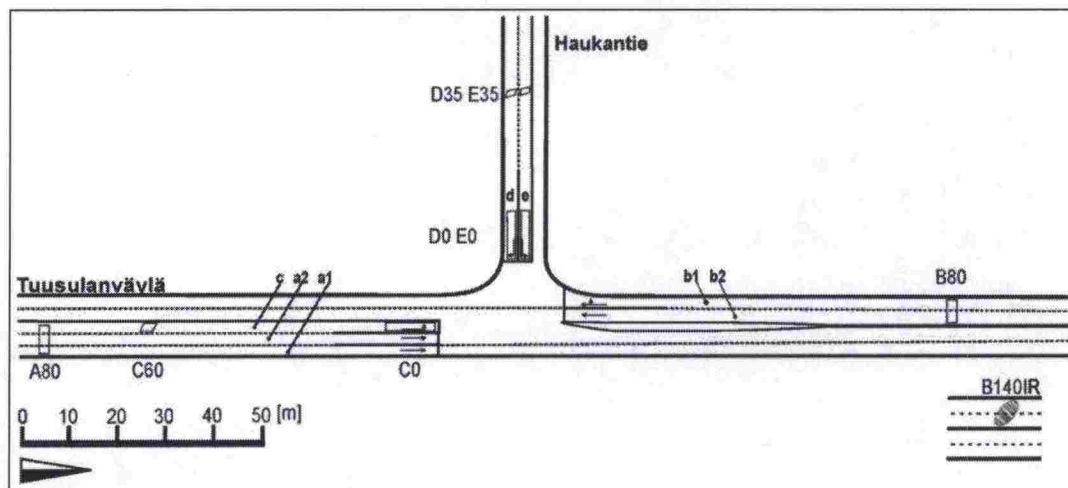
ALKAVA OPASTINRYHMÄ							
LOPETTAVA		A	B	C	D	E	F
	A				7	7	7
	B						7
	C				7		
	D	5		5			5
	E	4					
	F	5	6		5		

6.1.5. Haukantien liittymä

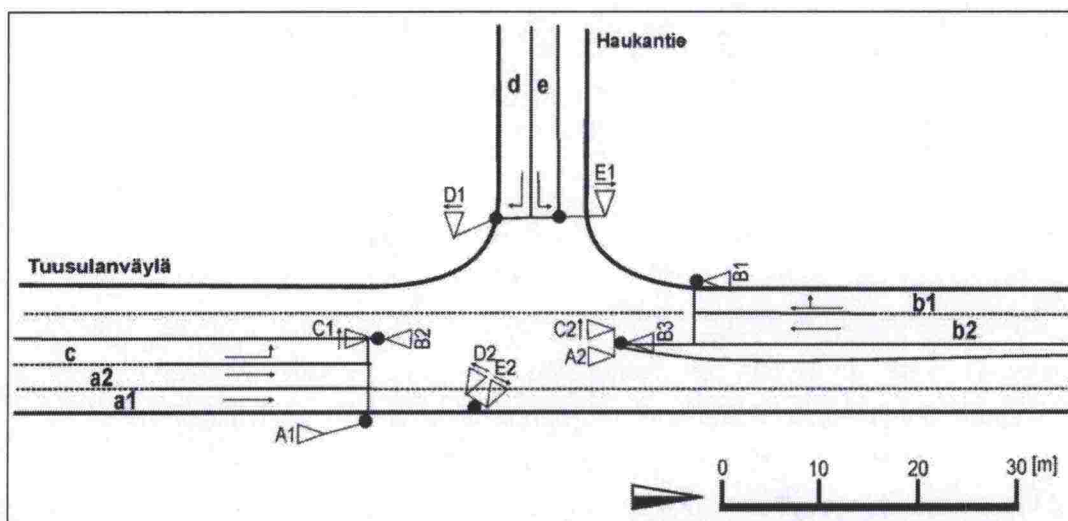
Testialueen pohjoisin eli Haukantien liittymä eroaa kahdesta aiemmasta liittymästä muun muassa siten, että se liittyy päätiehen länsipuolelta eikä päätiellä ole oikealle kääntyville ryhmittymiskaistaa. Päätien kummallakin tulosuunnalla on kaksi suoraan jatkavaa kaistaa (a,b), joista pohjoisen tulosuunnan läntisintä (b₁) käytetään myös Haukantielle käännäytessä. Eteläisellä tulosuunnalla on oma ryhmittymiskaista (c) Haukantielle. Kaistan pituus on 119 metriä. Haukantiella on kaista pohjoiseen (e) ja etelään (d) kääntyville ajoneuvoille. Kaistajärjestelyt on esitetty kuvassa 42.

Päätiellä on kolme opastinryhmää, jotka ohjaavat pohjoisesta ja etelästä suoraan meneviä sekä etelästä Haukantielle länteen kääntyviä. Haukantielle kääntyvien liikennevaloissa on nuoliopastin. Sivusuunnalla on nuoliopastimet etelään ja pohjoiseen kääntyville ajoneuvoille. Liittymän pää- ja toisto-opastimien sijainnit on merkitty kuvaan 43.

Päätien kulkuilmaisimet on sijoitettu kummallakin tulosuunnalla 80 metrin päähän pysäytysviivasta (A80, B80). Pohjoisen tulosuunnalla on myös 140 metrin päässä toinen kulkuilmaisimien (B140IR), joka on toteutettu infrapunailmaisimena. Haukantie liittymän pääsuunnan ainoalla ryhmittymiskaistalla on läsnäoloilmaisimien (C0) sekä kulkuilmaisimien 60 metrin etäisyydellä pysäytysviivasta (C60). Sivusuunnan kaistoilla on läsnäoloilmaisimet (D0,E0) ja kulkuilmaisimet 35 metrin etäisyydellä pysäytysviivasta (D35, E35). Kuvassa 42 on esitetty Haukantien ilmaisimien tyypit ja sijainnit.



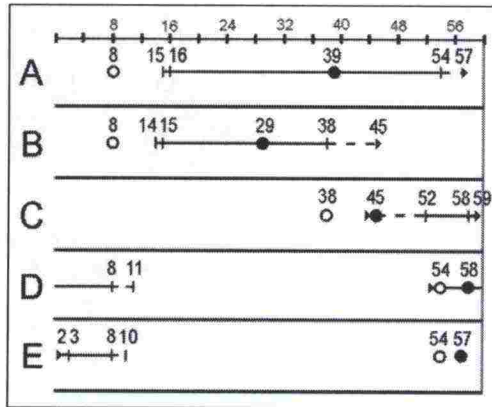
Kuva 42. Testialueen pohjoisimman liittymän Tuusulanväylä–Haukantie ilmaisimien ja kaistajärjestelyt.



Kuva 43. Haukantien liittymän opastinryhmäjärjestelyt.

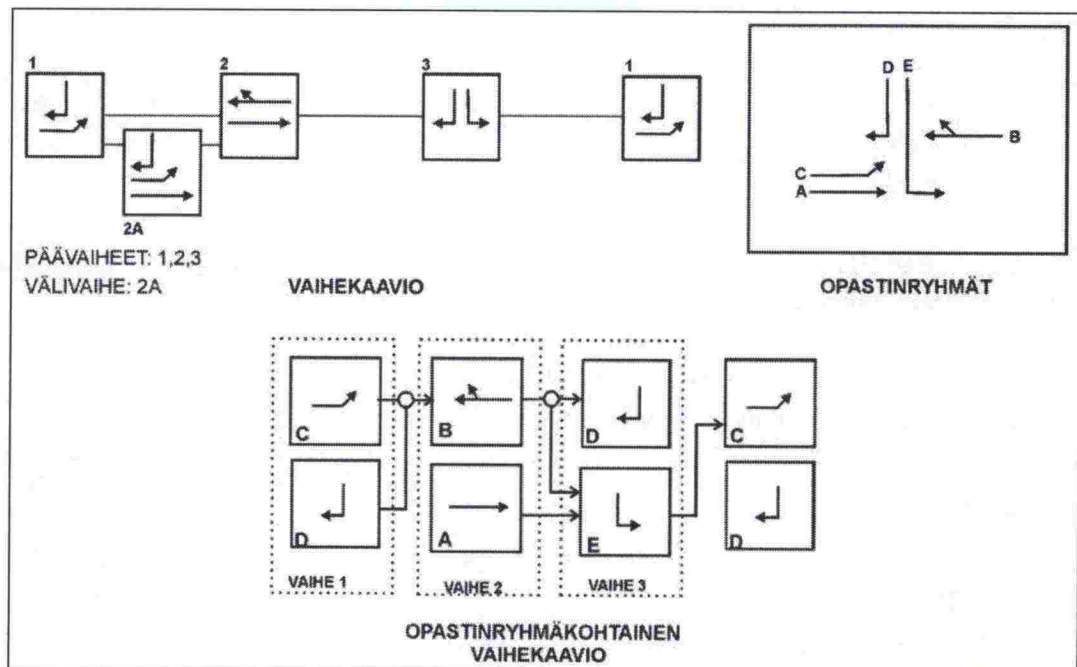
Haukantien liikennevalot toteuttavat kolmea valo-ohjelmaa kuten Vanhan Tuusulantien liittymässä ja samalla tavalla valo-ohjelmista kaksi toteuttaa yhteenkytkettyä valo-ohjausta. Kuvassa 44 on esitetty ohjelman 2 ajoituskaavio. Pääsuunnan suoraan menevien opastinryhmillä on vihreän aloitustapana kiinteä pyyntö. Muiden ryhmien vihreä

än pyyntö tulee ilmaisimilta. Pääsuunnalla vihreä päätetään konfliktiryhmän käynnistyessä ja sivusuunnalla ilman lisäehtoja.



Kuva 44. Ohjelman 2 mukainen ajoituskaavio Haukantien liittymässä.

Haukantien liittymän erillisohjauksessa on kolme päävaihetta ja yksi mahdollinen välivaihe. Kuvan 45 ensimmäisessä päävaiheessa ovat pääsuunnalta vasemmalle kääntyvien ja sivusuunnalta oikealle kääntyvien opastinryhmät. Toisessa päävaiheessa ovat suoraan menevien opastinryhmät, jota myös oikealle kääntyvät noudattavat. Kolmannessa vaiheessa ovat sivusuuntien opastinryhmät. Välivaihe 2A mahdollistaa opastinryhmän A vihreän vaihtumisen jo päävaiheen yksi aikana.



Kuva 45. Haukantien valo-ohjauksen vaihekaavio.

Erillisohjauksessa opastinryhmien vihreän aloitustapa on oma pyyntö. Opastinryhmien maksimivihreän laskenta aloitetaan vihreän aikana konfliktiryhmän pyynnöstä. Opastinryhmien vihreän lopetus toteutuu konfliktiryhmän käynnistyessä. Taulukossa 17 on esitetty erillisohjauksessa toteutettavien opastintilojen ajallisia kestoja opastinryhmittäin. Taulukossa 18 on suoja-ajat matriisimuodossa esitettynä. Eri valo-ohjelmissa on käytetty samoja suoja-aikoja.

Taulukko 17. Ohjelman 1 toteuttama opastintilojen ajalliset kestot [sekuntia].

op. ryhmät	keltainen	min. vihreä	max. vihreä
A	5	10	60
B	5	10	60
C	3	6	30
D	3	5	40
E	3	5	30

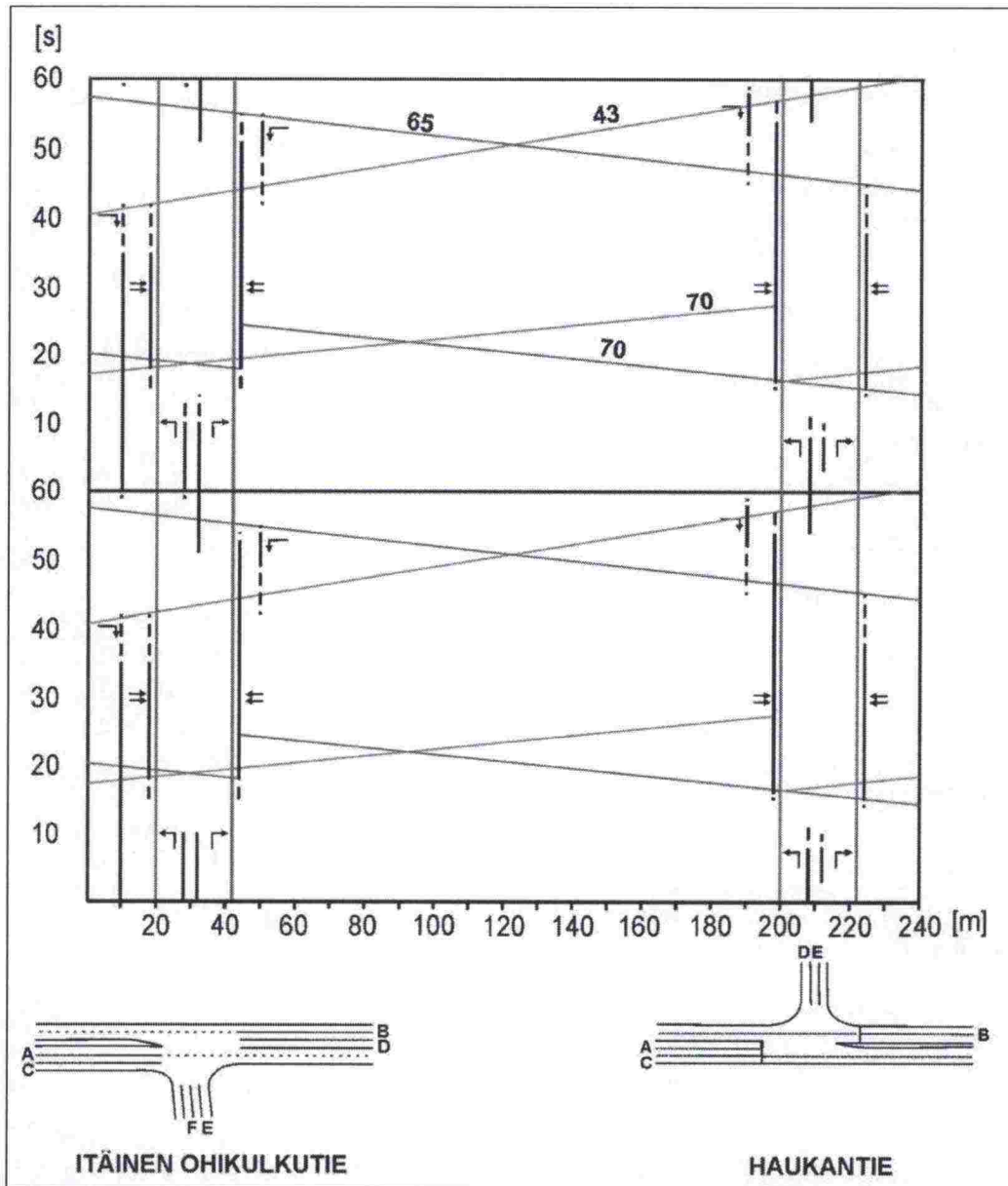
Taulukko 18. Konfliktiryhmien väliset suoja-ajat [sekuntia].

ALKAVA OPASTINRYHMÄ						
LOPETTAVA		A	B	C	D	E
	A					7
	B			7	7	7
	C		5			4
	D		4			
	E	6	5	5		

6.1.6. Itäisen Ohikulkutien ja Haukantien yhteenkytkentä

Testialueen pohjoisimpien liittymien liikennevalot ovat yhteenkytketyt. Iltapäivisin kysynnän huipputuntien aikana käytössä on 90 sekunnin valo-ohjelma. Muuten päivisin käytössä on 60 sekunnin ohjelma. Yöllä liikennevalot ovat erillisohjattuja. Pääsuunnan opastinryhmillä on kiinteä vihreän pyyntö lukuun ottamatta vasemmalle kääntyvien ajoneuvojen opastinryhmiä. Käytännössä tämä tarkoittaa pääsuunnan vihreää lepotilaa, kun liittymässä tai sitä lähestymässä ei ole ajoneuvoja. Oheisessa yhteenkytkentäkaaviossa (kuva 46) on esitetty ohjelman 2 toteuttama yhtenäinen valo-ohjaus Itäisen Ohikulkutien ja Haukantien liittymissä. Ohjelman 2 ajoituskaaviot on esitetty liittymäkohtaisesti kuvissa 40 ja 44. Yhteenkytkentäkaaviossa vihreän pidennykset on merkitty kat-

koviivalla. Vihreän aallon etureunan mitoitusnopeutena on käytetty 70 km/h, joka on testialueen nopeusrajoitus.



Kuva 46. Yhteenkytkentäkaavio Itäisen Ohikulkutien ja Haukantien ohjelmista 2.

Vähäisen liittymien lukumäärän vuoksi yhteenkytkentä ei aiheuta vihreän aallon etureunassa hidastusta. Päinvastoin liittymässä on pitkä ennakkoaika, jonka aikana edellisestä liittymästä sivusuunnalta tulleet pääsevät liikkeelle eivätkä hidasta pääsuunnan vihreässä aallossa tulevien ensimmäisten ajoneuvojen nopeuksia. Mitä vähemmän liittymiä on yhteenkytkennässä, sitä todennäköisemmin onnistutaan suunnittelemaan katkeamaton vihreä aalto. Yhteenkytkentäkaaviossa ei ole otettu huomioon, että liittymien liikennevalot ovat yhteenkytketty pohjoisempana sijaitsevien liittymien kanssa.

6.2. HUTSIM-malli

Liikennesimulointiin tarvittava malli toteutettiin testialueelta saatujen tietojen perusteella. Oleellimmat mitoitus- ja sijainti- ja liittymätiedot on koottu taulukkoon 19. Mallin syöttöpisteiden paikat määräytyvät kauimmaisten ilmaisimien mukaan. Jos ilmaisin on liian lähellä pysäytysviivaa, malliin syötetty ajoneuvo-olio ei pysty pysähtymään pysäytysviivalle. Se jatkaa liittymän ohi, vaikka opastinkuva on punainen. Tästä syystä testialueella Haukantie pohjoispuolelle lisättiin ylimääräiset kaistakohtaiset ilmaisimet. Ne sijoitettiin seuraavan eli Amerintien liittymän eteläpuolelle, 480 metrin päähän Haukantiestä (kuva 47). Lisätyt ilmaisimet ovat ainoastaan liikenteen laskentaa varten eivätkä ne vaikuta valo-ohjaukseen. Ilmaisimista saatu varaustieto lähetetään Haukantie liittymän kojeeseen.

Taulukko 19. Testialueen liittymien mitoitus- ja sijaintitiedot.

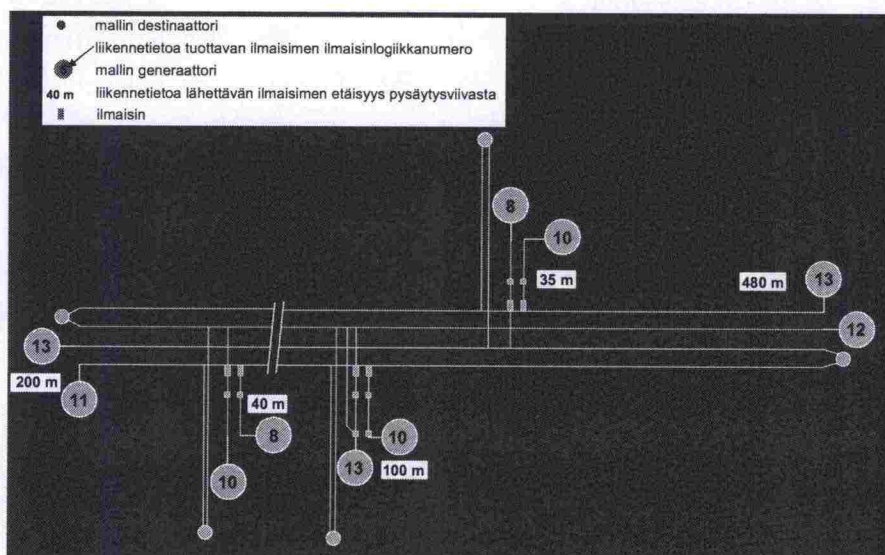
liittymä	sijainti edelliseen	opastinryhmät ilmaisimet	kauimmaiset ilmaisimet	kääntyvien kaistat
Vanha Tuusulantie	0 m	5 op.ryhmää 13 ilmaisinta	A,B 200 m D 60 m E,F 40 m	C (139 m) D (116 m) E (jatkuva) D (jatkuva)
Itäinen Ohikulkutie	1000 m	6 op.ryhmää 14 ilmaisinta	A 140 m B 80 m C 100 m D 35 m E, F 100 m	C (167 m) D (61 m) E (jatkuva) F (jatkuva)
Haukantie	200 m	5 op.ryhmää 10 ilmaisinta	A 80 m B 140 m C 60 m D, E 35 m	C (119 m) D (jatkuva) E (jatkuva)

Liittymien sivusuunnista Haukantiellä ja Vanhalla Tuusulantantiellä kauimmaiset ilmaisimet ovat 40 metrin päässä liittymästä (kuva 47). Syötetty ajoneuvo-olio ei pysty pysähtymään kyseisen matkan aikana punaisen opastinkuvan palaessa, jos ajoneuvo tulee generaattorista päätien keskinopeudella. Sivusuunnille ei asennettu uusia ilmaisimia, joten mallissa generaattoreiden paikkaa siirrettiin 60 metriä etäämmälle pysäytysviivasta. Muutoksen takia malliin syötetyt ajoneuvot sijaitsevat kauempana liittymästä kuin todelliset ajoneuvot. Kuitenkin niiden ajoneuvokohtainen tavoitenoisuus on päätien mukainen, mikä on mallin tulosten kannalta sijaintia merkittävämpi tekijä. Malli saa valo-ohjauksen erilliseltä simulaattorilta, jolloin ohjaus mukautuu mallin liikennetilanteeseen eikä aiheuta lisävirhettä. Koska Haukantie nopeusrajoitus on 50 km/h, voidaan olettaa, että mallin ajoneuvot saapuvat liittymään keskimäärin 4,3 sekuntia todellista tilannetta myöhemmin. Vanhalla Tuusulantantiellä nopeusrajoitus on 60 km/h, joten siellä syöt-

töpiteiden siirrosta aiheutuva viive on keskimäärin 3,6 sekuntia. Todellisuudessa ajoneuvo on jo saavuttanut pysäytysviivan kun mallissa ajoneuvo ylittää vasta kulkumaisimen.

Toinen korjaustapa olisi ollut syöttää sivusuuntien ajoneuvo-oliot keskimääräisten liikennemäärien mukaisesti, jolloin ajantasaista liikennetietoa olisi käytetty vain pääsuunnan syöttöasteissa. Tällöin syöttöasteiden sijainti ei aiheuttaisi malliin virhettä, mutta malliin syötetyt liikennemäärät olisivat alueen keskiarvoja. Tässä työssä päädyttiin tarkempaan liikennemäärään ja sijainniltaan todellisuudesta poikkeaviin ajoneuvoihin eli ensimmäiseen vaihtoehtoon. Valinnan perusteluna on se, että vaikka ajoneuvot eivät sijaitse todellisilla paikoilla, mallinnuksessa käytetään todellista liikennemäärää, joka tuottaa vertailukelpoisempia tuloksia. Jos simulointiohjelmisto saa myös opastinryhmien tilat mallinnettavalta alueelta, syöttöasteiden etäisyys liittymästä on oltava sama kuin reunamaisimien.

Valo-ohjauksen takia ilmaisimet on sijoitettu vastaamaan mahdollisimman tarkasti todellisuutta, sillä valo-ohjelmat on suunniteltu todellisten ilmaisimien mukaisesti. Mallin tulosuuntien kauimmat ilmaisimet ovat muutaman metrin todellista paikkaa lähempänä, lukuun ottamatta Haukantien ja Vanhan Tuusulantien tulosuuntia. Pääteasteet sijoitettiin huomattavasti syöttöasteita kauemmaksi liittymästä, jotta poistuvat ajoneuvo-oliot eivät tukkisi liittymäaluetta. Muuten pääteasteiden etäisyys ei vaikuta mallin tuloksiin.



Kuva 47. Simulointimallin generaattorien kuvaus.

Syöttöasteiden muuttujana ovat syötettyjen ajoneuvojen osuudet pääteaste-kohtaisesti. Toteutetussa simuloinnissa kääntymisjakaumien arvot ovat vakioita, mutta

ne voitaisiin toteuttaa myös ajantasaisesti, esimerkiksi 15 minuutin välein. Ajoneuvojen kääntymisosuudet laskettiin alueen keskimääräisistä vuorokausiliikennemääristä, jotka olivat laskettu Tiehallinnon liikennelaskentajärjestelmällä. Saatujen liikennetietojen perusteella ei voitu tarkasti määritellä eri suunnista tulleiden ajoneuvojen osuuksia. Tämä tarkoittaa tilannetta, jossa osa ajoneuvoista jatkaa liittymästä suoraan ja osa kääntyy, eikä tiedetä mistä syöttöpisteestä ajoneuvot ovat alueelle saapuneet. Syöttöpisteiden määränpääjakaumat laskettiin olettamalla, että liittymästä kääntyy jokaisen mahdollisen syöttöpisteen ajoneuvoja samassa suhteessa kuin niitä on saapunut liittymään edeltävälle alueelle. Esimerkiksi, syöttöpisteestä A saapuu 1000 ajoneuvo-oliota ja syöttöpisteestä B 100 oliota. Oletetaan, ettei muualta saavu liittymään ajoneuvoja. Seuraavassa liittymässä kääntyvistä ajoneuvoista 90 prosenttia on syöttöpisteestä A ja loput 10 prosenttia syöttöpisteestä B. Simuloinnin kannalta tarkemman kääntymistiedon kerääminen ei ole kannattavaa.

Ohessa on esimerkki, miten laskettiin etelästä eri tulosuunnista Itäiselle Ohikulkutielle kääntyvien ajoneuvojen määrät. Kääntyvä ajoneuvo on tullut joko suoraan etelästä tai kääntynyt edellisen liittymän sivusuunnalta päätielle. Etelästä suoraan tulee keskimäärin 16 000 ajoneuvoa vuorokaudessa ja Vanhalta Tuusulantieltä pohjoiseen kääntyy 1350 ajoneuvoa vuorokaudessa. Näiden liikennemäärien avulla laskettiin tulosuuntien suhdeluku. Kääntyvistä ajoneuvoista 92 prosenttia on etelästä ja loput 8 prosenttia Vanhalta Tuusulantieltä. Seuraavaksi laskettiin, paljonko Itäiselle Ohikulkutielle kääntyvien ajoneuvojen määrästä on 92 prosenttia. Saatu luku jaettiin eteläisen syöttöpisteen vuorokausiliikennemäärällä (16 000), ja tuloksena saatiin Itäiselle Ohikulkutielle kääntyvien ajoneuvojen osuus kyseisestä syöttöpisteestä. Sama laskutoimenpide tehtiin myös Vanhalta Tuusulantieltä kääntyvien liikennemäärälle. Esimerkki toistettiin kunnes kääntyvien ajoneuvojen tulosuuntien osuudet oli laskettu alueen liittymissä. Loput ajoneuvot ajoivat suoraan pohjoiseen tai etelään. Menetelmällä laskettiin taulukossa 20 olevat syöttöpisteiden määränpääjakaumat.

Taulukko 20. Generaattoreiden määränpäämatriisi.

dest/gen	11	12	31	32	41	42	51	52	21	22
ajon/vrk	16200		1350	90	650	4600	1700	1700	12400	
yksikkö	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
10	0	0	0	100	0	94	89	0	77	77
30	1	1	0	0	0	6	6	0	5	5
40	26	26	27	0	0	0	5	0	5	5
50	16	16	16	0	22	0	0	0	14	14
20	56	56	57	0	78	0	0	100	0	0
Summa	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Mallin opastimet on sijoitettu tulosuunnan ajoneuvoputken loppupäähän. Opastimien sijaintiparametrien (*Posit*) arvo on nolla.. Syötettyjen ajoneuvojen tavoite-

nopeusjakauma on pääsuunnan nopeusrajoituksen mukainen. Nopeusjakaumaksi valittiin normaalijakauma, jonka keskiarvo on 70 km/h ja keskihajonta 5,4. Jakauma on esitetty taulukossa 21. Se oli valmiina HUTSIMin ini-tiedostossa. Nopeusjakauman lisäksi ajoneuvo-olioiden nopeuksia voi säätää putkien nopeusrajoituksilla sekä nopeusrajoitusliikennemerkeillä. Putkien nopeusrajoitukset vastaavat todellisen tilanteen fyysisiä rajoitteita, kuten esimerkiksi jyrkkiä mutkia. Liittymissä olevien kääntyvien putkien nopeusrajoitukset on asetettu 30 km/h. Sivusuunnille on laitettu liikennemerkein nopeusrajoitukset todellisten nopeusrajoitusten mukaisesti. Liikennemerkit eivät vaikuta ajoneuvojen nopeuteen tultaessa päätielle. Pääsuunnalla ei ole nopeusrajoitusmerkkejä, sillä ajoneuvojen tavoitenopeudet ovat pääsuunnan nopeusrajoitusten mukaisia.

Taulukko 21. Malliin syötettyjen ajoneuvojen nopeusjakauma.

[km/h]	54	56	58	60	62	64	68	70	72	74	76	78	80	82	84
[%]	1	1	2	3	5	10	15	26	15	10	5	3	2	1	1

Nykytilanteen simulointi suoritettiin kahtena arkipäivänä 6–7.7.2004. Yhden simulointiajon pituus oli puolituntia ja ajoja tehtiin kahdeksan kertaa 9.00–15.00 välisenä aikana. Ajankohta valittiin siten, että mallinnettavalla alueella oli valo-ohjelma 2 käynnissä.

Simulointiajon tuloksena saatiin liittymistä aiheutuvat viivytykset. Ajoneuvojen viivytysmittauksia varten liikenneverkkomalliin lisättiin laskentailmaisimia (*output detector*). Ne sijoitettiin siten, että liittymistä saatiin jokaiselta tulosuunnalta kaistakohtaiset viivytystiedot. Tuloksien avulla analysoitiin liikenteen sujuvuutta nykyisten ohjelmien valo-ohjauksessa.

Suunniteltujen valo-ohjelmien tarkastelussa käytettiin samaa liikenneverkkomallia. Koe-tilanne oli muuten sama, paitsi kokesimulaattorien parametreja muutettiin uuden suunnitellun valo-ohjelman mukaiseksi. Simuloinnissa käytettiin samoja liikennemääräsyötteitä kuin nykytilan simuloinnissa. Syötetiedostona käytettiin arr-tiedostoa, joka tallennettiin simuloitaessa alueen liikennetilannetta nykyisillä valo-ohjelmilla.

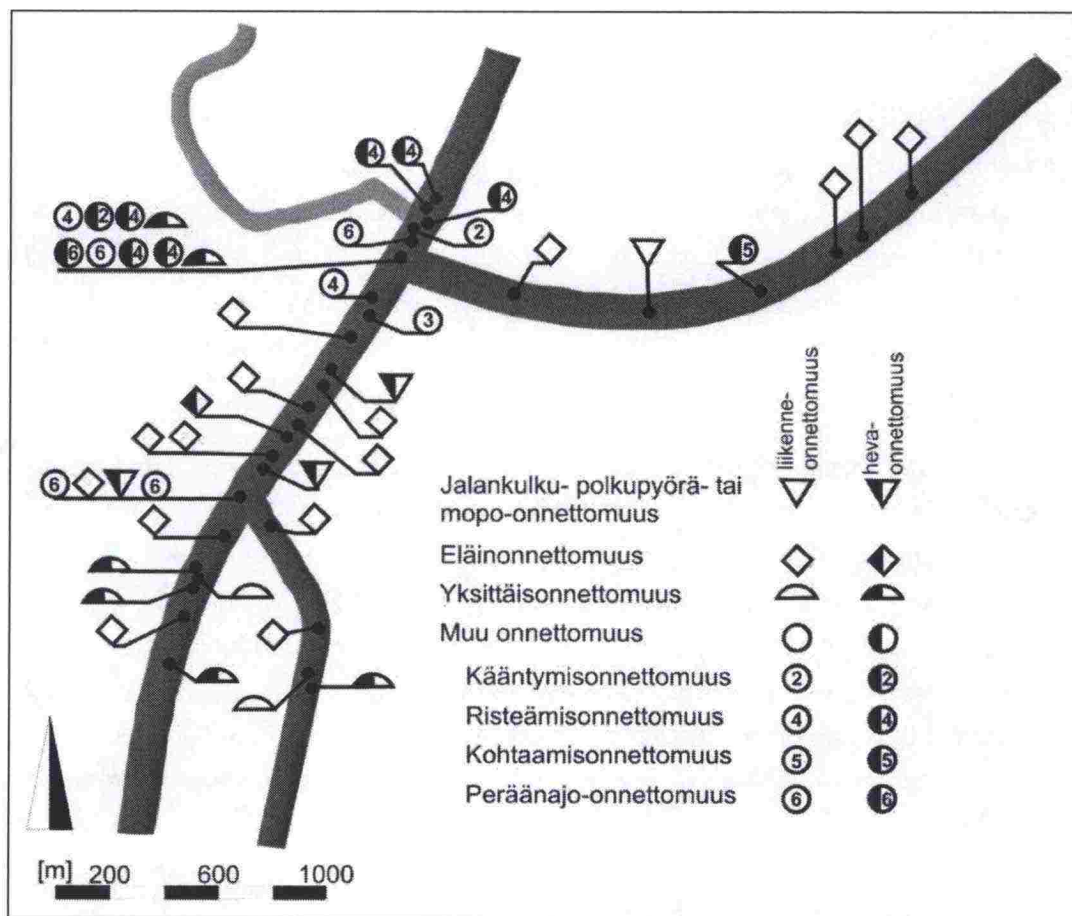
6.3. Alueen liikenteelliset ongelmat

6.3.1. Turvallisuus

Vanhan Tuusulantien liittymä on ensimmäinen valo-ohjauksinen liittymä moottoritien päätyttyä kantatiellä 45. Päätien liikenneturvallisuutta heikentää valo-ohjauksesta aiheutuva jono iltapäivän ruuhkahuipun aikana. Ilman jonoa moottoritien ja ensimmäisen

liittymän välimatka on turvallisuuden kannalta riittävä, mutta pitkä jono lyhentää välimatkaa aiheuttaen mahdollisesti kuljettajalle äkillisiä liikennetilanteen muutoksia. Lisäksi turvallisuutta heikentää ajoneuvojen suuri tilannenopeus. Moottoritien päätyttyä kuljettajat eivät välttämättä hidasta nopeutta rajoitusten mukaisesti. Liikenneympäristö vaihtuu kuitenkin nopeasti taajamamaiseksi ja jonottaminen voi tulla moottoritien päätyttyä yllätyksenä, jolloin mahdollisesti syntyy vaaratilanteita. Testialueella on havaittu myös ajoneuvojen ajavan liittymään punaisen opastinkuvan aikana.

Turvallisuusepäkohdista ei ole todistettua tutkimustietoa, vaan ne ovat tienkäyttäjien huomioita alueella tapahtuvista liikennetilanteista. Testialueen tarkempi liikenneturvallisuusanalyysi on tehty liikenneonnettomuuskartoituksen avulla. Onnettomuustilasto on Tiehallinnon ylläpitämä. Tilaston liikenneonnettomuudet ovat tapahtuneet yleisillä teillä vuosina 1999–2003. Kartoitus tehtiin hieman laajemmin kuin mallinnettava alue, sillä liittymän vaikutusalueita liikenneturvallisuuteen ei voi tarkasti määrittää. Analyysiin otettiin mukaan kaikki alueella tapahtuneet onnettomuudet, vaikka osaan onnettomuustyypeistä ei välttämättä vaikuta liittymän läheisyys. Viiden vuoden aikana alueella tapahtui yhteensä 44 liikenneonnettomuutta, joista 19 johti henkilövahinkoihin. Kantatiellä 45 liittymien kohdalla, eli enintään 100 metrin etäisyydellä liittymästä, tapahtui 24 liikenneonnettomuutta. Näistä vähän yli puolet johti henkilövahinkoihin. Moottoritien päätyttyä ennen ensimmäistä liittymää liikenneonnettomuuksia tapahtui viisi, joista kolme oli henkilövahinkoon johtanut onnettomuutta. Lähes kaikilla päätien onnettomuuspaikoilla nopeakajajointus on 70 km/h. Ainoastaan eteläisimmän paikan nopeakajajointus on 100 km/h. Liittymien sivusuunnista Vanha Tuusulantie ja Itäinen Ohikulkutie ovat yleisiä teitä. Tilaston mukaan sivuteillä tapahtui kuusi liikenneonnettomuutta alle kilometrin etäisyydellä päätien liittymästä. Näistä yksi oli henkilövahinkoon johtanut onnettomuus. Vanhan Tuusulantien tarkastellulla tiejaksolla on päätien liittymän lisäksi myös yksi katuliittymä noin 100 metrin etäisyydellä Tuusulanväylästä. Itäisen Ohikulkutien tieosuudella on kaksi katuliittymää. Kuvassa 48 on kuvattu testialueen liittymissä tapahtuneiden onnettomuuksien paikat ja tyypit. Liittymien läheisyydessä tapahtuneissa peräänajo-, kääntymis- ja risteämisonnettomuuksissa olleiden osapuolten tulosuunnat on esitetty taulukossa 22.



Kuva 48. Testialueella tapahtuneet onnettomuudet vuosina 1999-2003.

Taulukko 22. Testialueen liittymien läheisyydessä tapahtuneet onnettomuudet.

Vanha Tuusulantie			Itäinen Ohikulkutie				Haukantie		
onnettomuus-luokka	osatulosuunnat		onnettomuus-luokka	osatulosuunnat			onnettomuus-luokka	osatulosuunnat	
	os. 1	os. 2		os. 1	os. 2	os. 3		os. 1	os. 2
peräänajo	A	A	peräänajo	B	B	B	peräänajo	A	A
peräänajo	A	A	risteämis	A	F		kääntymis	D	D
peräänajo	A	A	risteämis	F	A		risteämis	D	A
			risteämis	F	A	B	risteämis	D	A
			peräänajo	A	A		risteämis	A	D
			peräänajo	A	A				
			risteämis	A	F				
			kääntymis	F	A				

6.3.2. Sujuvuus

Testialueen nykytilanteen sujuvuus mitattiin simuloimalla alueen liikennetilanne kehityllä simulointijärjestelmällä. Kojesimulaattoreiden valo-ohjelmat on kopioitu testialueen todellisista kojeista, joten simuloinnin valo-ohjaus toteuttaa samaa ohjelmaa kuin todellisessa tilanteessa. Edellä kuvatuista eroista johtuen valo-ohjaus ei välttämättä toteudu simuloinnissa samalla tavalla kuin maastossa. Simulointi tuottaa kuitenkin todenmukaisia viivytystuloksia, sillä liikennemäärä on todellinen ajantasaisen liikennetietojärjestelmän ansiosta.

Kehitetyn simulointijärjestelmän koesimulaattorit eivät tahdista automaattisesti toisiaan eli kojeiden kierrot saattavat simuloinnin aikana alkaa eri aikaan. Tämä voi aiheuttaa muutoksia yhteenkytkettyjen liikennevalojen vihreän aallon toteutumiselle. Varsinkin ohjelmien vaihtuessa kojeiden kierto saattaa muuttua eri vaiheisiin. Kiertoaikaa voi seurata koesimulaattoreista ja käyttäjä voi simuloinnin alussa muuttaa kierrot samaan vaiheeseen manuaalisesti. Synkronointiongelmien takia liittymien sujuvuustarkastelu tehdään vain yhden valo-ohjelman osalta. Tarkasteluun valittiin ohjelma 2, jotta sujuvuustuloksena saatuja viivytyksiä voidaan verrata uuden valo-ohjelman aikana mitattuihin viivytyksiin.

Kun simulointiajo on lyhyt, kojeiden kiertoajat pysyvät tahdissa ja ohjelmien kaatuminen on epätodennäköisempää. Koesimulaattorin kaatuessa lyhyen simulointiajon uudelleen simuloiminen vie vähemmän aikaa. Seuraavan ajon alkaessa edellisen simuloinnin häiriöt eivät vaikuta uuden tuloksiin. Kaatumisen todennäköisyys minimoidaan käynnistämällä koesimulaattorit ja tietokone uudelleen muutaman ajon välein, jolloin mahdollinen muistivuoto korjaantuu. Koska simuloinnin alussa liikennetilanteen normalisoituminen kestää muutaman minuutin, ensimmäisen viiden minuutin viivytyksiä ei huomioida tuloksissa.

Sujuvuustarkasteluja tehdään kahden päivän ajalta. Ensimmäisen päivän simulointiajo kestää puolituntia. Alkuvalmisteluineen simulointiin varataan aikaa noin 45 minuuttia. Päivän aikana ehditään tehdä kahdeksan simulointiajoa. Niiden aloitusajankohdat on esitetty oheisessa taulukossa. Toisena päivänä simulointiajojen kesto on tunti. Eripituisilla ajoilla testataan vaikuttaako ajon pituus viivytystuloksiin. Myös tunnin mittaiset simulointiajot aloitetaan yhdeksältä aamulla. Päivän aikana ehditään toteuttamaan viisi tunninmittaista simulointiajoa, jos seuraava aloitetaan heti edellisen päätyttyä.

Taulukko 23. Simulointiajojen aloitusajankohdat.

1.	9:00	5.	12:00
2.	9:45	6.	12:45
3.	10:30	7.	13:30
4.	11:15	8.	14:15

Simulointiajokohtaiset sujuvuustulokset ovat liitteessä 4. Tuloksista laskettiin liikennemäärillä painotetut keskiarvot (taulukko 24). Liittymien tulosuuntien kirjaintunnisteet ovat samat kuin liittymien nykytilakuvauksessa. Testialueen sujuvuustarkastelussa analysoitiin simulointimallinnuksessa toteutuneet ajoneuvokohtaiset viivytykset sekä pysähtyvien ajoneuvojen osuudet liittymäkohtaisesti. HUTSIM-ohjelmistossa viivytys lasketaan ajoneuvon satunnaisesti valitun tavoitenopeuden ja toteutuneen matkanopeuden erotuksen avulla. Tulokset lasketaan kaistakohtaisten laskentailmaisimien ja päätepisteiden avulla. Kun ajoneuvo ylittää laskentailmaisimen tai poistuu mallista, tulostiedostoon tallentuu muun muassa ajoneuvon viivytys sekunteina edellisestä mittauspisteestä. Jokaisen mittauspisteen jälkeen laskenta aloitetaan nollasta.

Taulukko 24. Testialueen sujuvuustarkastelu liikennesimuloinnin avulla.

tulosuunta		6.7.2004			7.7.2004		
		viivytys	pysähtyvien osuus	liikennemäärä	viivytys	pysähtyvien osuus	liikennemäärä
		[sek./ajon.]	%	[ajon./h]	[sek./ajon.]	%	[ajon./h]
Vanha Tuusulantie	A	4,27	17,0	606	3,93	14,7	560
	B	1,06	3,1	668	1,37	4,9	579
	C	27,25	71,1	124	28,79	76,9	107
	D	26,85	79,1	87	27,74	80,2	86
	E	53,65	95,0	4	48,89	97,4	7
Itäinen Ohikulkutie	A	11,49	47,5	500	12,53	47,0	461
	B	3,00	12,9	566	2,95	12,9	484
	C	9,29	27,1	202	9,14	23,0	187
	D	29,24	92,2	138	32,08	96,2	121
	E	15,91	47,1	30	18,35	66,7	27
	F	28,20	81,9	211	31,26	82,7	200
Haukantie	A	0,74	2,0	487	0,81	2,2	448
	B(suor.)	7,37	30,9	612	7,75	32,1	536
	B(käänt.)	13,60	44,6	36	12,99	42,6	29
	C	27,66	83,9	41	28,50	91,9	39
	D	25,71	73,7	87	27,52	77,7	73
	E	40,26	92,8	56	38,51	91,4	47

Testialueella oli enemmän liikennettä ensimmäisenä mittauspäivänä. Liikennemäärä-vaihtelu ei vaikuttanut merkittävästi viivytystuloksiin. Kumpanakin mittauspäivänä suu-

rimmat viivytykset ovat samoilla tulosuunnilla. Simulointien aikana alueen liikennemäärät olivat laskettuja huipputuntiliikennemääriä vähäisemmät (kts. kuva 33), mikä johtuu simulointiajankohdasta.

Testialueella pääsuunnan sujuvuus on sivusuuntia parempi. Jokaisen liittymän kohdalla pääsuunnan viivytykset ovat lyhyemmät ja pysähtyvien ajoneuvojen osuudet ovat pienemmät kuin sivusuunnilla. Pisimmät viiveet pääsuunnalla ovat Itäisen Ohikulkutien liittymässä, kun ajoneuvot saapuvat liittymään etelästä (tulosuunta A). Tulosuunnalla lähes joka toinen ajoneuvo joutuu pysähtymään. Liittymien sivusuunnilla noin kolme ajoneuvoa neljästä joutuu odottamaan valoissa ja viivytykset ovat keskimäärin puoli minuuttia (28 sekuntia/ajoneuvo). Suoraan jatkavien ja kääntyvien viivytysvertailussa kannattaa huomioida kääntymisestä aiheutuva nopeuden hidastuminen, joka vaikuttaa tuloksiin.

6.4. Valo-ohjauksen parantaminen

6.4.1. Tavoitteet

Integroidun simulointijärjestelmän toimivuutta testattiin käytännön tasolla suunnittele-malla uudet valo-ohjelmat testialueen liittymiin ja simuloimalla uusien ohjelmien muodostama liikennetilanne. Tarkoituksena oli verrata simuloinnin avulla uusien valo-ohjelmien aiheuttamia viivytyksiä nykytilanteeseen. Tämä vastasi todellista liikennevalosuunnittelutilannetta, jota varten kyseinen järjestelmä kehitettiin.

Vaikka tavoitteena oli lähinnä vain simulointijärjestelmän testaus, uudet valo-ohjelmat voidaan ottaa käyttöön, jos ne aiheuttavat alueelle vähemmän viivytyksiä tai parantavat alueen turvallisuutta. Liikenneturvallisuuden muutoksia voi analysoida muun muassa tarkastelemalla valojen ajoituksia. Jos liikennevalosuunnitelmasta tehdään kokonaisvaltaisempi selvitys, testialueen läheisyydessä olevat Tuusulanväylän muut valo-ohjauksiset liittymät tulee lisätä suunnitelmaan. Tällöin suunnitelman tuloksena saadaan valo-ohjauksisista liittymistä muodostuva toimiva kokonaisuus.

Liittymien valo-ohjaus on toteutettu liikennetieto-ohjauksella, joka käyttää aikavälin pidentämis-algoritmia. Kun liikenne on ruuhkautunut, toteutetaan yleensä maksimiaikoja, jolloin liikennetieto-ohjauksen tuoma hyöty viivytysten minimointiin ja liikenneturvallisuuden parantamiseen on vähäistä. Suunnittelussa keskitytään päiväliikenteen valo-ohjauksen kehittämiseen. Tällöin liikennemäärävaihtelut ovat suurempia ja liikennetieto-ohjauksen edut näkyvät selvemmin. Päiväliikenteen aikana liikennevalot toteuttavat ohjelman kaksi mukaista valo-ohjausta.

Liikennevalosuunnitelman sujuvuustavoitteena oli varmistaa pääsuunnan sujuva eteneminen. Sujuvuutta parannettiin liittämällä eteläisin eli Vanhan Tuusulantien liittymä Tuusulanväylän yhtenäiseen valo-ohjaukseen. Yleensä ohjaustapana käytetään erillisohjausta, jos liittymien väli on yli 1000 metriä ja nopeusrajoitus on 70 km/h (Tiehallinto 1996). Vanhan Tuusulantien ja Itäisen Ohikulkutien liittymien etäisyys on yhteenkytännän rajatapaus. Kehitetyn simulointijärjestelmän avulla testattiin miten liittymien pitkä etäisyys vaikuttaa vihreän aallon toteutumiseen.

Eteläisimmän liittymän liikennevalojen yhteenkytkentä saattaa heikentää etelästä tulevien liikenneturvallisuutta. Tiehallinnon (1996) mukaan erillisohjauksessa tapahtuu peräänajo-onnettomuuksia vähemmän kuin yhteenkytketyissä liikennevaloissa. Yhteenkytkennässä vihreän rajoitetumpi vaihtelumahdollisuus vähentää muun muassa mahdollisuuksia löytää turvallinen lopetushetki vihreän maksimajan täyttyessä. Toisaalta, koko testialuetta ajatellen yhteenkytkentä saattaa parantaa alueen turvallisuutta, sillä suurin osa ajoneuvoista kulkee vihreässä aallossa, jolloin ne saapuvat seuraavaan liittymään vihreän aikana.

Liikennevalosuunnitelman turvallisuustavoitteeksi asetettiin, ettei alueen liikenneturvallisuus heikkene laajennetun yhteenkytkennän myötä. Nykyisessä tilanteessa testialueen turvattomin kohta on keskimäinen eli Itäisen Ohikulkutien liittymä. Sen läheisyydessä on tapahtunut liittymäalueelle ominaisia risteämis- ja peräänajo-onnettomuuksia. Valo-ohjausmuutosten myötä myös eteläisen tulosuunnan ajoneuvoista suurin osa saapuu liittymään vihreän aikana, jolloin valoista aiheutuvat vaaratilanteet ovat vähäisiä, jopa olemattomia.

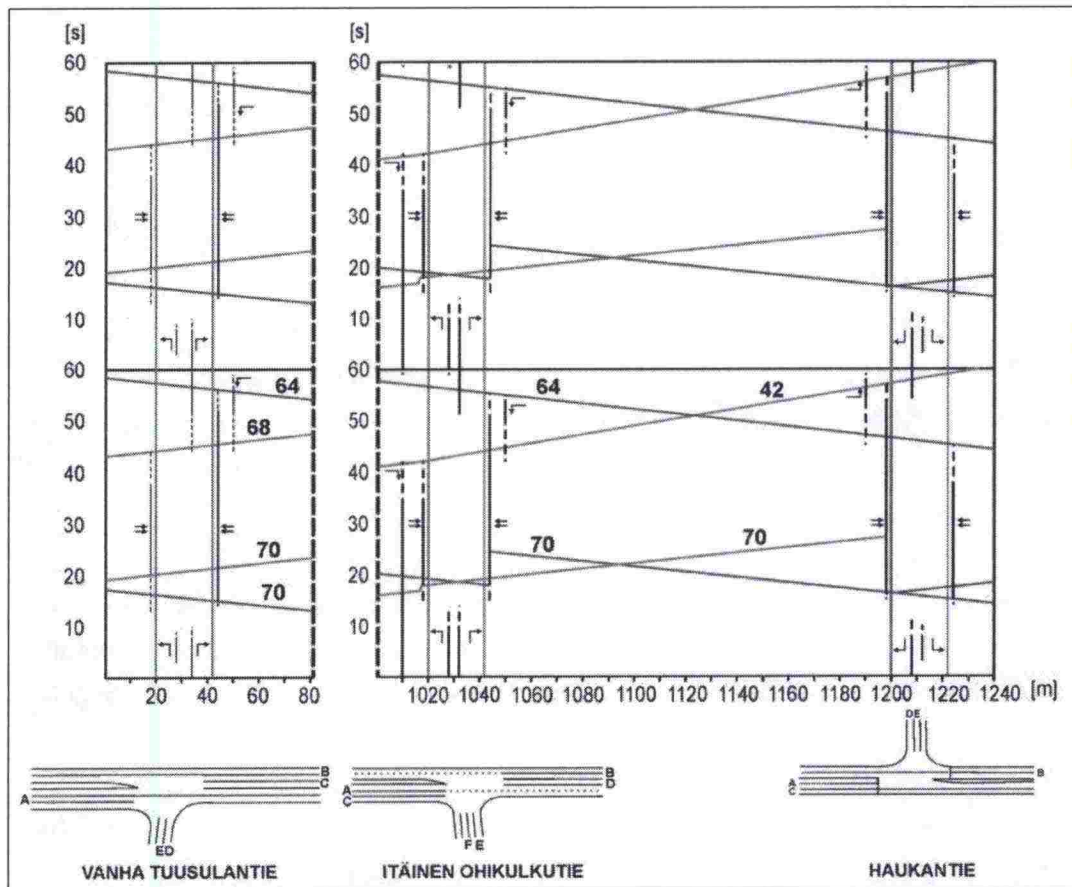
Vihreän mahdollisimman turvallinen lopetushetki varmistetaan valinta-alueen tyhjenystoiminnolla, joka toteutetaan joka opastinryhmälle. Vihreän hallittua lopettamista voidaan parantaa myös lopetusviiveellä aallon takareunan jälkeen, kun seuraa vihreänä käsky on annettu ja opastinryhmän normaali pidennysmahdollisuus on poistettu.

Liikennevalosuunnitelma rajattiin testialueen liittymiin, sillä kehitetyn simulointijärjestelmän tarvitsema laitteisto asennettiin testausvaiheessa vain kolmeen liittymään. Koska tarkoituksena oli säilyttää Tuusulanväylällä nykyinen liikennevalojen yhteenkytkentä, Itäisen Ohikulkutien ja Haukantien liittymien valo-ohjausten vihreän ajoitusta ei muutettu. Ajoituksen muuttaminen olisi voinut rikkoa nykyisin toteutuvan vihreän aallon. Vanhan Tuusulantien uusi valo-ohjaus suunniteltiin niin, että se mukautui muiden liittymien nykyisiin yhteenkytkentäohjelmiin. Itäisen Ohikulkutien ja Haukantien valo-ohjausmuutosten suunnittelutavoitteeksi on asetettu liikenneturvallisuuden mahdollinen

parantaminen. Tarkempi liikennevalosuunnitelma liittymien nykyisten ohjelmien muutoksista on kuvattu seuraavassa kappaleessa

6.4.2. Liittymien uudet valo-ohjelmat

Vanhan Tuusulantien liittymään suunniteltiin uusi valo-ohjelma, jossa liikennevalot on yhteenkytketty Tuusulanväylän muiden liikennevalojen kanssa. Suunniteltua ohjelmaa 2 toteutetaan liittymässä arkisin 6:00–15:00 ja 18:00–21:00 sekä viikonloppuisin 6:00–20:00. Suunnittelun lähtökohtana oli vihreän aallon toteutuminen Tuusulanväylällä, mikä edellyttää kiinteää kiertoaikaa ja vihreiden esiintymisajankohtien rajoittamista. Kiertoaika on muiden liittymien valo-ohjelmien mukainen eli 60 sekuntia. Testialueen liikennevalojen yhteenkytkentä on esitetty yhteenkytkentäkaavion avulla (kuva 49).



Kuva 49. Uusien valo-ohjelmien toteuttama yhteenkytkentäkaavio.

Liittymän riittävä välityskyky myös aamun huipputunnin aikana varmistettiin laskemalla ajoitus myös ruotsalaisen menetelmän mukaan. Menetelmän avulla määritettiin tulosuunnille suhteellisen liikennemäärän mukainen vihreän kesto. Liittymän mitoitustiikennemääränä käytettiin aamun huipputunnin liikennemäärää (kuva 33). Ajoituslaskelma

on liitteessä 5. Laskentamenetelmää käytetään yleensä erillisohjatuissa liikennevaloissa, jossa kiertoaika voidaan määrittää liittymäkohtaisesti. Menetelmän avulla voidaan tarkistaa riittävä välityskyky myös yhteenkytkettyjen liikennevalojen liittymissä.

Taulukossa 25 on esitetty opastinryhmien vihreän kestot uudessa valo-ohjelmassa. Aamun huipputunnin aikana uuden ohjelman toteutuessa liittymän kuormitusaste on 0,95, jolloin laatutaso on Tiehallinnon (1996) määrittymen mukaan tyydyttävä. Muulloin liittymien laatutaso on hyvä. Liittymän kriittiseen polkuun kuuluvat kaistat, joita ohjaavat opastinryhmät B ja E. Kriittisellä polulla suoja-aikojen summa on 13 sekuntia. Ajoitusta laskettaessa opastinryhmän B vihreän perusarvo on 44 sekuntia, joka on liian pitkä aika kyseiselle liittymälle, kun kiertoaika on 60 sekuntia. Koska yhteenkytkentäohjelman kiertoaika on vakio ja opastinryhmän E vihreän aikaa ei voi olla minimivihreää pienempi, ryhmän B vihreän ajan maksimiarvo on 41 sekuntia. Päiväliikenteen aikana ryhmän B perusvihreän arvo on 11 sekuntia.

Taulukko 25. Valo-ohjelman 2 vihreän ajat.

Opastinryhmä	Vihreä aika [s]
A	24
B	41
C	8
D	17
E	6

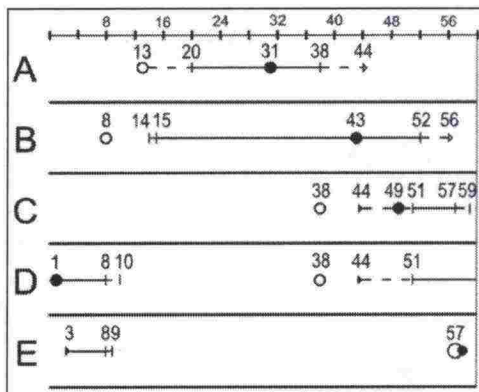
Taulukon 25 arvot toteutuvat, kun kaikilla tulosuunnilla on pyyntö kierron aikana ja vihreää pidennetään mahdollisimman pitkään. Jos jonkun tulosuunnan vihreän aika jää lyhyemmäksi, konfliktiryhmät saattavat hyötyä siitä saamalla aiemmin vihreää. Uuden valo-ohjelman ajoitukset on kuvattu tarkemmin ajoituskaaviossa (kuva 50). Vihreän minimi, keltaisen kesto tai suoja-ajat eivät muuttuneet erillisohjauksen arvoista.

Valo-ohjauksen vaihejärjestystä muutettiin siten, että opastinryhmät A ja B saavat vihreää, kun vihreän aallon etu- ja takareunan nopeusviivat ovat liittymän kohdalla. Uuden ohjelman toteuttama opastinryhmien ajoitus on esitetty ajoituskaaviossa (kuva 50).

Opastinryhmän A vihreän aloituslupa on ajoitettu viisi sekuntia myöhempään kuin opastinryhmän B aloituslupa, jotta vihreän aallon etureuna ei joudu hidastamaan seuraavassa liittymässä. Tällöin myös seuraavan liittymän opastinryhmän on päästävä vihreälle, kun se on saanut vihreän aloituslupan. Opastinryhmät C ja D saavat vihreän

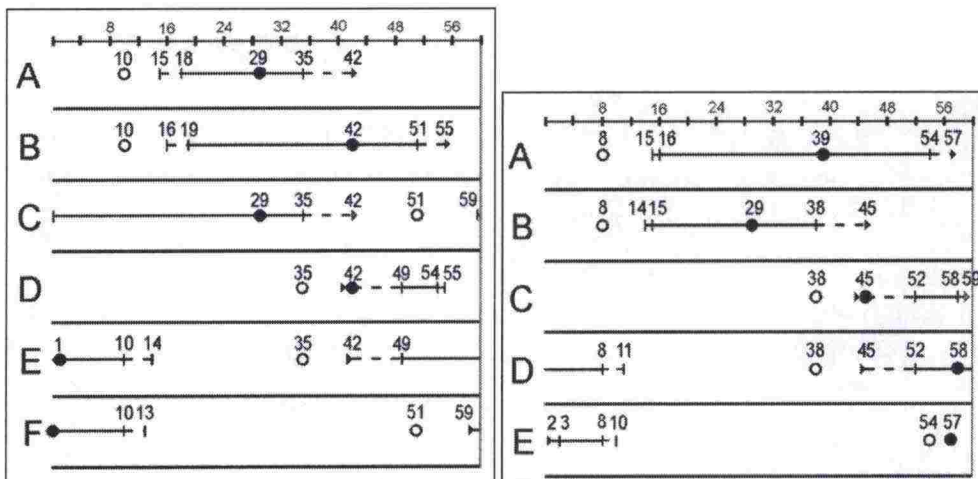
aloitusluvan samaan aikaan. Ryhmä E pääsee vihreälle, kun sen kolmen konfliktiryhmän (A, B, C) vihreät ovat päättyneet.

Opastinryhmien A ja B vihreän aloitustapa on kiinteä pyyntö ja lopetustapa konfliktiryhmän käynnistyessä. Muiden ryhmien aloitustapa on oma pyyntö ja lopetustapa ilman lisäehtoja eli itse punaiselle. Kaaviossa yhtenäinen viiva ja sen jälkeinen katkoviiva on taulukossa 25 olevan opastinryhmän vihreän keston pituinen. Ennen yhtenäistä viivaa oleva katkoviiva toteutuu vihreänä, jos konfliktiryhmien vihreät eivät pidenny maksimiinsa. Opastinryhmä voi näyttää vihreää aloitusluvan saatuaan, jos edellisen vaiheen konfliktiryhmät eivät olleet vihreällä.



Kuva 50. Vanhan Tuusulantien liittymän valo-ohjelman 2 ajoituskaavio.

Muiden liittymien valo-ohjelmia 2 muutettiin niin, että sivusuunnalta oikealle kääntyvien opastinryhmä saa vihreän aloitusluvan samaan aikaan kun pääsuunnalta vasempaan kääntyvien opastinryhmä. Muutettujen ohjelmien vihreän ajoitukset on kuvattu oheisissa ajoituskaavioissa. Vaihejärjestystä ei muutettu, jotta vihreä aalto ei katkea testialueen rajalla.



Kuva 51. Itäisen Ohikulkutien ja Haukantie liittymien ajoituskaaviot (ohjelma 2).

Uudessa valo-ohjelmassa on toteutettu valinta-alueen tyhjennystoiminto. Viimeisen kymmenen sekunnin aikana toiminto suoritetaan suunnittain, jolloin opastinryhmä vaihtuu punaiseksi omien pidennysten jälkeen, kun konfliktiryhmällä on pyyntö. Vihreän keston pituutta rajataan myös lyhyemmillä pidennysaikaväleillä suunnittaisen valinta-alueen tyhjennystoiminnon aikana. Valo-ohjelmissa on toteutettu jonon purkutoiminto riittävän pitkän kiinteän vihreän avulla.

Lepotilaa ei muutettu eli ohjelmassa pääsuunnalla suoraan menevillä ja oikealle kääntyvillä on vihreä lepotila ja muilla on punainen. Testialueella ensisijaisesti huolehditaan pääsuunnan sujuvuudesta myös valo-ohjelmamuutosten jälkeen. Erityisesti Vanhan Tuusulantien liittymässä tulosuunta B hyötyy vihreästä lepotilasta, sillä sivusuunnalta kääntyy erittäin harvoin ajoneuvoja vasemmalle. Käytännössä liittymän yhteenkytkettyjen liikennevalojen ajoitukset voidaan suunnitella niin, että huomioidaan vain tulosuunnan A vihreä aalto, sillä opastinryhmä B saa lähes jatkuvasti vihreää.

6.4.3. Tulokset

Uusien valo-ohjelmien toimivuus testattiin simuloimalla testialueen liittymät samoilla liikennesyötetiedoilla kuin simuloidessa nykyistä liikennetilannetta. Nykytilanteen ja uusien ohjelmien simulointitulosten ajoneuvomäärissä on eroja, koska nykytilanteen mitauksissa tuloksia tallennettiin kolme minuuttia vähemmän aikaa. Simulointiohjelmiston alkuasetuksissa voidaan määrittää simuloinnin alusta ajankohta, jota ennen tapahtuneet tilanteet eivät vaikuta tuloksiin. Epähuomiossa nykytilanteen simuloinneissa ajankohta määritettiin pidemmäksi kuin simuloidessa uusien ohjelmien aikaista liikennetilannetta. Muuten uusien valo-ohjelmien simulointiajojen pituudet ja ajankohdat olivat samat kuin nykytilanteen simuloinnissa.

HUTSIMin graafisesta käyttöliittymästä voi tarkastella ajoneuvo-olioiden etenemistä simuloinnin aikana. Testialueen simulointimallin vihreä aalto ei toiminut tulosuunnalla A uusien valo-ohjelmien aikana, sillä ajoneuvot saapuivat Itäisen Ohikulkutien liittymään liian aikaisin. Koska tulosuunnan A ajoneuvot pysähtyivät liittymään lähes jokaisen kierroksen aikana ja tulokset jo kahden ensimmäisen simulointiajon jälkeen osoittivat virheellisestä suunnittelusta, Vanhan Tuusulantien valo-ohjauksen ajoitusta muokattiin ja liikennetilanne simuloitiin uudelleen. Yhteenkytkentäkaavion (kuva 49) mukaisesti suunniteltujen valo-ohjelmien (ohjelma 2_a) simulointitulokset on esitetty taulukossa 26. Taulukossa on neljän simulointiajon viivytystulosten painotettu keskiarvo.

Taulukko 26. Yhteenkytkentäkaavion mukaisen valo-ohjauksen sujuvuustarkastelu.

tulosuunta		viivytys	pysähtyvien osuus	liikennemäärä
		[sek./ajon.]	%	[ajon./h]
Vanha Tuusulantie	A	12,35	41,8	546
	B	0,72	2,1	631
	C	33,12	75,3	104
	D	31,28	77,0	84
	E	50,67	100,0	5
Itäinen Ohikulkutie	A	8,50	29,8	450
	B	2,77	11,8	540
	C	7,82	13,1	180
	D	29,48	93,3	140
	E	13,97	49,3	30
	F	29,40	81,4	196
Haukantie	A	0,78	2,0	620
	B(suor.)	8,07	34,0	690
	B(käänt.)	14,03	45,3	41
	C	39,52	92,7	53
	D	28,61	75,2	102
	E	47,82	92,6	58

Tarkkaillessa simulointimallin graafista toteutusta huomattiin uudessa ohjelmassa suunnitteluvirhe. Vanhan Tuusulantien liittymässä tulosuunnan A opastinryhmän vihreänoituslupa oli liian aikaisessa vaiheessa kiertoa, jolloin vihreä aalto katkesi seuraavaan liittymään. Uudessa vaihtoehdossa (valo-ohjelma 2_b) vihreän ajoituksia siirrettiin kahdeksan sekuntia myöhemmäksi. Valo-ohjelman muutos ei vaikuttanut tulosuunnan B vihreään aaltoon, sillä opastinryhmä saa lähes koko ajan vihreää. Tulosuunnan B konfliktiryhmän (E) liikennemäärä on erittäin pieni, jolloin opastinryhmä saa hyvin harvoin vihreää. Uudelleen muokatun valo-ohjelman toteutuessa liikennesimuloinnin avulla tehdyt sujuvuustarkastelun tulokset ovat taulukossa 27.

Taulukko 27. Valo-ohjelman toisen vaihtoehdon aikaiset viivytykset.

tulosuunta		viivytys	pysähtyvien osuus	liikennemäärä
		[sek./ajon.]	%	[ajon./h]
Vanha Tuusulantie	A	12,22	40,8	436
	B	1,24	4,7	457
	C	34,05	64,5	83
	D	33,44	77,5	63
	E	46,81	97,2	5
Itäinen Ohikulkutie	A	7,34	21,2	358
	B	3,04	13,7	388
	C	8,55	16,8	141
	D	31,07	96,5	96
	E	16,63	54,9	24
	F	28,98	82,8	157
Haukantie	A	0,63	1,7	350
	B(suor.)	7,60	31,3	428
	B(käänt.)	11,45	34,8	24
	C	32,22	91,6	31
	D	27,05	78,9	61
	E	38,06	90,1	38

Liikennevalojen onnistunut yhteenkytkentä parantaa erityisesti pääsuunnalla suoraan ajavien viivytyksiä ja vähentää pysähtyvien ajoneuvojen osuutta. Testialueella Vanhan Tuusulantien liittymän liikennevalojen yhteenkytkennän pitäisi vaikuttaa erityisesti Itäisen Ohikulkutien liittymän tulosuunnan A sujuvuuteen. Oheisessa taulukossa on viivytystiedot ja pysähtyneiden ajoneuvojen osuudet kyseisen tulosuunnan osalta nykyisen ja kahden uuden valo-ohjelman aikana. Taulukossa on erotettu edellisessä liittymässä suoraan ajaneet ja Vanhalta Tuusulantieltä päätielle kääntyneet ajoneuvot. Koska nykytilan eri simulointiajojen viivytystuloksissa (*liite 4*) ei ollut merkittäviä eroja, liittymän uuden valo-ohjelman eri vaihtoehtojen sujuvuusvertailussa ovat mukana neljä simulointiajoa, joiden liikennetieto on talletettu 6.7.2004 ja alkamisajankohdat ovat 9:00, 9:45, 10:30 ja 12:45.

Taulukko 28. Itäisen Ohikulkutien liittymän tulosuunnan A viivytykset.

tulosuunta	nykytila		yhteenkytkentäkaavion mukainen		vihreän ajoitus 8 sekuntia myöhemmin	
	viivytys [sek]	pysähtyneet %	viivytys [sek]	pysähtyneet %	viivytys [sek]	pysähtyneet %
A (suor)	12,1	46,9	7,6	27,0	4,0	7,8
A (käänt)	11,3	50,6	13,8	47,1	24,9	88,7

Uusimman valo-ohjelman 2_b ja nykyisen ohjelman sujuvuusvertailu on tehty simulointitulosten perusteella. Nykyisistä viivytyksistä on vähennetty uuden ohjelman aikaiset

viivytykset. Samoin nykyisin pysähtyneiden ajoneuvojen osuudesta on vähennetty uuden ohjelman aikaiset arvot.

Taulukko 29. Nykyisen ja uuden valo-ohjelman aikana mitattujen viivytysten ja pysähtyvien ajoneuvojen osuuksien erotukset (nykyinen-uusi).

tulosuunta		6.7.2004		7.7.2004	
		viivytys [s/ajon.]	pysähtyvien osuus %	viivytys [s/ajon.]	pysähtyvien osuus %
Vanha Tuusulantie	A	-8,7	-27,0	-8,3	-26,1
	B	0,4	0,9	0,1	0,2
	C	-5,6	2,5	-5,3	12,5
	D	-4,1	5,6	-5,7	2,8
	E	4,9	-5,0	2,1	0,1
Itäinen Ohikulkutie	A	3,7	27,1	5,2	25,8
	B	0,0	-0,4	-0,1	-0,8
	C	0,8	13,8	0,6	6,2
	D	-1,7	-4,6	1,0	-0,3
	E	0,5	-6,1	1,7	11,8
	F	-0,6	-0,3	2,3	-0,1
Haukantie	A	0,2	0,4	0,2	0,4
	B(suor.)	-0,1	-0,2	0,1	0,8
	B(käänt.)	1,7	8,6	1,5	7,8
	C	0,5	-5,8	-3,7	0,3
	D	-1,2	-0,9	0,5	-1,3
	E	-0,6	-1,8	0,4	1,4

Uusien valo-ohjelmien vaikutus testialueen liikenneturvallisuuteen voidaan mitata simuloinnin avulla esimerkiksi laskemalla ajoneuvojen määrä valinta-alueella, kun opastinryhmän vihreä on päättymässä. Itäisen Ohikulkutien ja Haukantien liittymien valo-ohjelmia ei muutettu valinta-alueen tyhjennystoiminnon osalta. Vanhan Tuusulantien liittymässä ei voitu tehdä turvallisuustarkastelua, sillä HUTSIM-malli kaatui, jos liittymän läheisyyteen lisäsi laskentailmaisimia. Ohjelmiston kaatumisen syytä ei tiedetä.

7. YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT

7.1. Integroitu simulointijärjestelmä

7.1.1. Toteutuneet tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena oli toteuttaa integroitu simulointijärjestelmä, joka hyödyntää uusinta teknologiaa mallintaessa mahdollisimman todennukaisesti liikennetilannetta. Toteutettuun järjestelmään kuuluvat HUTSIM-simulointiohjelmiston lisäksi EC-1 kokesimulaattoriohjelmisto ja ajantasainen liikennetietojärjestelmä, joka tuottaa lähes reaaliaikaisesti tietoa mallinnettavalta alueelta. Järjestelmän viive on alle sekunti. Kokesimulaattori toteuttaa valo-ohjausta samoin periaattein kuin todellinen koje, joten liikennesimuloinnin valo-ohjaus on todellisen ohjauksen kaltainen.

Tavoitteeksi asetetun simulointijärjestelmän toteutuksessa onnistuttiin ja järjestelmä saatiin toimimaan suunnitellulla tavalla. Käytännön toteutus oli tärkeä osa menetelmän kehittämistä, sillä sovellusvaiheessa voitiin kiistatta osoittaa, että suunniteltu uudentyyppinen järjestelmä oli mahdollista toteuttaa. Myös järjestelmän tuomat mahdollisuudet konkretisoituivat paremmin sovellusvaiheessa.

Ajantasaisen simulointimallin todennukaisuus testattiin vertaamalla mallin ajoneuvoliikenteiden määrää todelliseen tilanteeseen. Simulointimallin liikennemäärä erosi alle prosentin todellisesta liikennemäärästä. Testaustulos on hyvä verrattaessa sitä yleisesti ilmajärvivirheisiin, mistä simulointijärjestelmän liikennemäärävirhe todennäköisesti johtui. Testaus tehtiin kesällä, joten ajantasaisen simulointimallin todennukaisuus on hyvä tarkistaa myös talvisissa olosuhteissa, jos järjestelmää käytetään suunnittelun apuvälineenä talvella.

Osajärjestelmien väliset viestiyhteydet määritettiin mahdollisimman yksiselitteisesti, jotta välitettävän tiedon hyödyntäminen koko järjestelmän osalta oli mahdollista. Viestissä on kaikki tarpeellinen tieto kuitenkin niin, että mallinnettavien liittymien määrä ei hidasta tai hankaloita tiedon lähettämistä ja perille pääsyä. Tiedonvälityksestä johtuvat alle sekunnin viiveet eivät aiheuta simulointijärjestelmään merkittäviä toimintahäiriöitä.

Simulointijärjestelmää varten suunniteltiin yksilöllinen tietoliikenneyhteys ja tietoverkko. Koska ajantasainen simulointijärjestelmä pystytettiin ensimmäistä kertaa, toteutuksessa käytettävien resurssien arviointi oli vaikeaa ja toteutus vei enemmän aikaa kuin oli ajateltu. Todennäköisesti seuraavien simulointijärjestelmien pystyttäminen tapahtuu

nopeammin, vaikka tietoliikenneyhteyden toimivuus vaihtelee tapauskohtaisesti ja pystyttämiseen liittyvät haasteet vaihtuvat ympäristön mukaan.

7.1.2. Simulointijärjestelmän ominaisuudet

Simulointitulosten ollessa luotettavia ne tukevat muuta liikennesuunnittelua. Liian moni epävarmuustekijä heikentää mallin ja tulosten käytettävyyttä. Integroitu simulointijärjestelmä, jossa on ajantasainen liikenteen syöttötieto ja todellisen kojeen mukainen valo-ohjaus, mahdollistaa tavallista simulointia tarkemman liikenteen mallinnuksen ja luotettavimmat tulokset. Mikrotason simulointimalli sopii erinomaisesti liikennevalosuunnittelutyöhön, jossa tarkastellaan yksittäisten ajoneuvojen viivytyksiä ja nopeuden muutoksia. Mallissa mitataan jonojen hajaantuminen, eri kääntymissuunnista saapuvat ajoneuvot ja liikenteen satunnaisvaihtelu.

Kun teknologia kehittyy edelleen ja järjestelmien hinnat laskevat entisestään, ajantasaisen liikennetiedon kerääminen ja hyödyntäminen on nykyistä halvempaa. Simulointijärjestelmän pystyttäminen on myös helpompaa, kun uusien liikennevalolaitteiden avulla pystytään rakentamaan nopea tietoliikenneverkko, eikä erillisiä laitteistoja ajantasaista simulointijärjestelmää varten tarvita. Jos liittyisiin asennetaan MDSL-yksiköt ainoastaan ajantasaista liikennetietojärjestelmää varten, simulointitulosten käyttötarkoituksen perusteella on mietittävä, onko taloudellisesti kannattavaa käyttää mallinnuksessa ajantasaista liikennetietoa.

Kehitetty simulointijärjestelmä on tarkoitettu lähinnä valo-ohjauksisten liittymien mallintamiseen, mutta ajantasaista liikennetietojärjestelmää voidaan hyödyntää myös mallinnettaessa muita liikennejärjestelmiä ja -tilanteita. Muun muassa liikenteen automaattisia mittauspisteitä voidaan hyödyntää mallinnettaessa tieverkon liikennemääriä. LAMPisteiden hyödyntämistä heikentää niiden harva sijainti toisiinsa nähden. Valo-ohjauksisten liittymien sijainti toisiinsa nähden on yleensä tarpeeksi tiivis, jolloin alueen mallintaminen ajantasaisella mikrosimulointijärjestelmällä on mielekästä.

Integroidun simulointijärjestelmän toteutuksessa keskityttiin eri osajärjestelmien tuottaman tiedon hyödyntämiseen liikennesimuloinnissa, jolloin toimintavarmuus ei ollut menetelmän kehittämisen kannalta aivan välttämätöntä. Toimintavarmuuden merkitys kuitenkin kasvaa olennaisesti, jos kehitetystä simulointijärjestelmästä halutaan tehdä ohjelmistotuote liikennesuunnittelun apuvälineeksi.

Integroidun simulointijärjestelmän luotettavuus määräytyy epäluotettavimman osajärjestelmän mukaan. Nykyisin järjestelmällä voidaan simuloida vain lyhyitä, enintään tun-

nin mittaisia ajoja, sillä liittymäkohtaiset simulaattorit kaatuvat pitkien, useita tunteja kestävien simulointiajojen aikana. Samalla katkeaa viestiyhteys liikennesimulointiohjelmistoon jolloin opastinolioiden tilat eivät päivity. Tarkkaa syytä tai ajankohtaa kojесimulaattorin kaatumiselle ei löydetty.

Liikennevalojen yhteenkytkennässä todellisten kojeiden kesken lähetetään signaaleja, joiden avulla kojeet pysyvät kierron suhteen samassa tahdissa. Simuloitaessa valo-ohjausta EC-1 kojесimulaattorien avulla on hyvä huomioda, etteivät kojесimulaattorit tahdistaa toisiaan. Käyttäjä voi kojесimulaattorin kellojen avulla tahdistaa simulaattorit samaan vaiheeseen ennen simulointia. Manuaalisesti toteutettuna tahdistuksen pystyy tekemään noin sekunnin tarkkuudella. Kesken simuloinnin kojесimulaattorin uudelleen tahdistaminen voi aiheuttaa tuloksiin virheitä, sillä kojeen toiminta on pysäytettävä tahdistamisen ajaksi.

Ajantasaisen liikennetietojärjestelmän toimintavarmuus testattiin tarkkailemalla simuloinnin aikana järjestelmän toimintaa ja lähettyjä viestejä, aivan kuten testattiin EC-1 kojесimulaattorin soveltuvuutta järjestelmässä. Tutkimuksen aikana uutta tiedonvälitysjärjestelmää sovellettiin käytäntöön ensimmäistä kertaa. Yleisesti ottaen järjestelmä toimi hyvin ja oikein. Kuitenkin, maastossa ulkoiset tekijät heikentävät järjestelmän toimintavarmuutta. Esimerkiksi sää vaikuttaa sähkölaitteiden toimintaan. Myös pitkät välimatkat heikentävät yhteyden luotettavuutta. Muun muassa tietoverkon takia integroidun simulointijärjestelmän ylläpitokustannukset ovat tavallista simulointiohjelmistoa kalliimmat.

Ylläpito muodostui sovellusvaiheen aikana ajantasaisen liikennetietojärjestelmän merkittävimmäksi tekijäksi. Järjestelmän ylläpito vastaa osittain liikennevalojen ylläpitoa, sillä myös liikennevalojen käytettävyyden kannalta niiden ylläpito on merkittävä tekijä. Kummatkin järjestelmät toimivat itsenäisesti maastossa ja niitä tarkkaillaan tietoverkon avulla etäkoneelta. Ajantasaiseen simulointijärjestelmään ei ole vielä kehitetty erillistä ohjelmistoa, jonka avulla järjestelmän toimivuutta voisi tarkkailla. Siksi järjestelmää käytettäessä on osattava jonkin verran tietoliikenteen perusteita, joka sinänsä kuuluu nykyisessä Internet-yhteiskunnassa yleissivistykseen. Käyttäjän on tiedettävä muun muassa osajärjestelmien julkiset IP-osoitteet ja tietoliikenneporttien numerot. Ongelmatilanteissa on myös hyvä osata tarkistaa mistä yhteys on poikki, jolloin vian etsintä nopeutuu. Integroitu simulointijärjestelmä on pyritty toteuttamaan mahdollisimman käyttäjystävällisesti. Tavoitteessa on onnistuttu kohtuullisesti ottaen huomioon, että järjestelmä on vasta kehityksensä alkuvaiheessa ja esimerkiksi sen tuotteistamiseen liittyvät toimenpiteet ovat vielä kesken.

Liikenneverkkomallin syöttöpisteet sijoitetaan yhtä etäälle liittymästä kuin mallinnettavalla alueella sijaitsevat rajailmaisimet. Simulointimallin kauimmaiset ilmaisimet sijoitetaan todellisia ilmaisimia hieman lähemmäksi liittymää, jolloin ilmaisinoirot havaitsevat ajoneuvo-oirot hieman todellista liikennetilannetta myöhemmin. Toisaalta, ajoneuvo-oiroiden sijainti mallissa eroaa todennäköisesti joka tapauksessa todellisista ajoneuvoista, sillä oiroiden nopeus ja mahdollinen kääntyminen valitaan satunnaisesti jakauman perusteella. Jos testialueen reunailmaisim sijoittaa liian lähellä liittymää, siirretään syöttöpiste kauemmaksi, jolloin ajoneuvoilla on enemmän aikaa reagoida tulosuunnan opastinryhmän tilaan. Tällöin reunailmaisimet sijoitetaan malliin todellisten ilmaisimien mukaisesti

7.1.3. Jatkokehittämis- ja tutkimuskohteet

Integroidun simulointijärjestelmän käytettävyyden paranee, jos kaikki osajärjestelmät toimivat Linux-käyttöjärjestelmässä. Silloin ohjelmistot voidaan linkittää paremmin yhteen. Muutoksen jälkeen järjestelmään voidaan lisätä yhtenäinen käyttöliittymä, jonka avulla ilmoitetaan miten järjestelmää halutaan käytettävän. Simuloinnin aikana liikennesimulointiohjelmisto lähettää komentoja muille osajärjestelmille, jotka tuottavat automaattisesti komennon mukaista tietoa. Muutoksesta huolimatta ohjelmistot toimisivat edelleen myös itsenäisesti, joten perusidea integroidusta järjestelmästä säilyy.

Simulointijärjestelmän ominaisuuksia voidaan hyödyntää paremmin, jos järjestelmä olisi nykyistä luotettavampi. Erityisesti EC-1 kokesimulaattoriohjelmistoa tulisi kehittää niin, että sen toimintavarmuus olisi parempi. Ohjelmiston kehitys ja ylläpito tehdään Peek Trafficin toimesta. Kokesimulaattorin luotettavuus saattaa parantua, kun se siirretään Linux-ympäristöön. Asiasta on keskusteltu ohjelmiston kehittäjien kanssa.

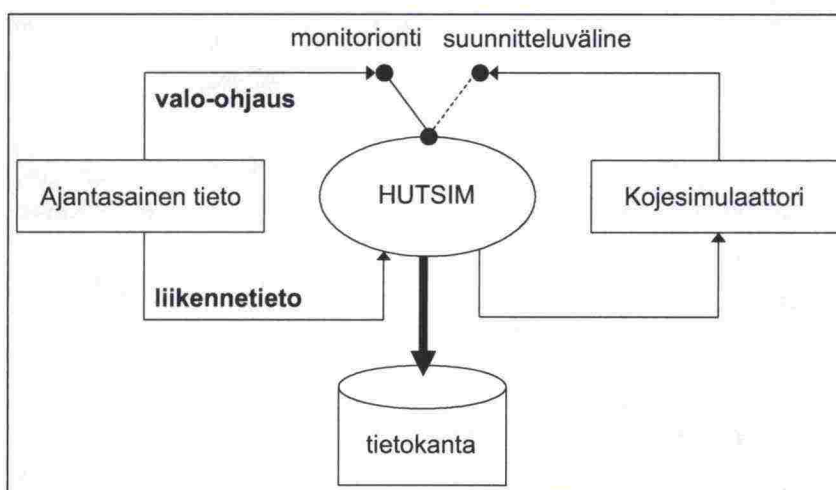
Nykyisten ominaisuuksien kehittämisen lisäksi integroituun simulointijärjestelmään on mahdollista lisätä uusia osajärjestelmiä, jotka osittain myös parantavat nykyisten ohjelmien toimivuutta. Järjestelmää voidaan parantaa toteuttamalla automaattisesti päivittyvä tietokanta, joka jalostaa kerätystä liikennetiedosta kuvaajia ja taulukoita (Kuva 52). Arjamaa (2003) aloitti ajantasaisesti päivittyvän tietokannan kehitystyötä omassa diplomityössään. Kehitystyötä on jatkettu keskittyen erityisesti HUTSIMin ja tietokannan väliseen rajapintaan.

Tietokannan avulla mallinnettavalta alueelta lähetettävä tieto saadaan tallennettua omaan järjestelmään. Tarkoituksena on kehittää tietokantaa siten, että se toimisi ajantasaisen liikennetietojärjestelmän tapaan lähettämällä ilmaisim- tai opastintilarivit yksittellen samassa järjestyksessä ja taajuudessa kuin ne on tietokantaan talletettu. Tieto-

kannan avulla voidaan simuloida aiemmin tapahtunut liikennetilanne, vaikka tapahtumahetkellä järjestelmä ei ole mallintanut tilannetta.

Ajantasaista liikennetietojärjestelmää käyttäen voidaan hyödyntää mallinnettavalta alueelta myös muutakin tietoa kuin alueen rajailmaisimien havaintoja. Mallia voidaan automaattisesti kalibroida simuloinnin aikana. Mitä enemmän tietoa saadaan sitä paremmin simulointimalli vastaa todellista liikennetilannetta. Esimerkiksi simulointimalli voi toteuttaa opastimien tilat todellisten opastinryhmien mukaan, jolloin simulointimallin valo-ohjaus mukautuu todelliseen liikennetilanteeseen. Tällöin simulointimallissa olevien syöttöpisteiden ja todellisten rajailmaisimien etäisyydet liittymästä on oltava samat, jotta simulointimallin liikennetilanne olisi mahdollisimman yhtäläinen todellisen tilanteen kanssa.

Edelleen mallia voidaan parantaa hyödyntämällä sisäisten ilmaisimien havaintoja ajoneuvoista, jolloin voidaan mallintaa todellisen tilanteen mukaan ajoneuvo-olion reitti. Jos mallinnettavan alueen reunailmaisimet ovat kaksoissilmukoita, malliin voidaan lähettää tieto ajoneuvon nopeudesta ja tyypistä. Kun simulointimalliin syötetään todellisen tilanteen mukainen liikenne ja valo-ohjaus, simulointijärjestelmä mahdollistaa nykytilanteen tarkkailun laboratorio-olosuhteissa. Kuvassa 52 on esitetty nykyisestä järjestelmästä kehitetty versio, jossa liikennesimulointiohjelmisto voi mallintaa valo-ohjauksen joko todellisen tilanteen mukaan tai kokesimulaattorin avulla. Myös ajantasaisesti päivittyvä tietokanta on esitetty kuvassa.



Kuva 52. Ajantasainen liikenteen seurantajärjestelmä

Tulevaisuudessa voidaan tutkia myös muiden mittauslaitteiden kuin ilmaisimien hyödyntämistä simulointijärjestelmässä. Jo nyt voidaan käyttää esimerkiksi videokuvaa tarkastaessa kuinka todenmukaisesti simulointijärjestelmä mallintaa todellista liikenneti-

lannetta. Jatkuvasti lisääntyvät GPS-lisälaitteet ajoneuvoissa lisäävät mahdollisesti liikennetiedon saatavuutta. Matkapuhelimet lähettävät jatkuvasti yksilöiviä signaaleja, joita voitaisiin jo nykytekniikan avulla hyödyntää mallintamisessa. Nykylainsäädännön yksityisyyssuoja kuitenkin estää ajoneuvojen seuraamisen GSM-signaalien avulla. Menetelmää voisi kehittää siten, että yksittäisten signaalien sijasta käytetään alueellista tietoa, jolloin yksittäisen ihmisen tiedot eivät tallentuisi tietokantaan.

7.2. Tuusulan testialueen valo-ohjaus

7.2.1. Uudet valo-ohjelmat

Tavoitteena oli testata integroidun simulointijärjestelmän soveltuvuutta suunnittelun apuvälineeksi ja muuttaa Tuusulan testialueen valo-ohjausta siten, että alueen liikenneturvallisuus ja sujuvuus paranisivat. Liikennevalosuunnitelmaan kuuluivat kolme Tuusulanväylällä sijaitsevaa liittymää, jotka ovat Vanha Tuusulantien, Itäisen Ohikulkutien ja Haukantien liittymät. Nykytilanteessa Itäisen Ohikulkutien ja Haukantien liittymien liikennevalot ovat yhteenkytketty Tuusulanväylän muiden pohjoisempaan sijaitsevien liittymien kanssa. Laaditussa liikennevalosuunnitelmassa myös Vanhan Tuusulantien liittymä on yhteenkytketty alueelliseen valo-ohjaukseen. Suunniteltu ohjelma on tarkoitettu toteutettavaksi päiväsaikaan. Suunnittelun apuna käytettiin integroitua simulointijärjestelmää, joten samalla testattiin simulointijärjestelmän toimivuus todellisessa suunnittelutilanteessa.

Uusien valo-ohjelmien simulointitulokset olivat odotuksenmukaiset, vaikka simulointi suoritettiin liikennetutkimuksen kannalta huonoon aikaan. Heinäkuussa tehdyn vaikutustarkastelun aikana liikennemäärät poikkesivat normaalista tilanteesta kesälomakauden takia. Vaikutustarkastelua ei voinut tehdä aikaisemmin, sillä järjestelmässä oli huomattavia luotettavuusongelmia. Projektin oli määrä päättyä syksyllä, joten tarkastelua ei voitu myöskään siirtää myöhemmäksi. Ajankohdasta huolimatta tulokset kuitenkin mukailivat muuttunutta valo-ohjausta. Esimerkiksi Itäisen Ohikulkutien liittymän viivytykset pääsuunnalla vähenivät, sillä Vanhan Tuusulantien liittymän yhteenkytkennän myötä suurin osa etelästä tulevista ajoneuvoista tuli liittymään vihreässä aallossa. Tutkimusajankohdasta johtuvan mahdollisen virheen takia pieniä viivytyseroja ei huomioitu.

Aamuisin alueen suurin liikennemäärä toteutuu pohjoisesta etelään eli Helsinkiin ja iltapäivisin vastakkaiseen suuntaan. Uudet valo-ohjelmat ovat käytössä aamun huippu-tunnin aikana, joten ohjelmien ajoitusta suunniteltaessa käytettiin aamun mitoitusliikennemääriä. Vaikka pääsuunta saa kiertoajasta suurimman osan vihreää, sillä sivusuun-

tien kysyntä on erittäin vähäistä, pohjoisesta etelään kulkevia ajoneuvoja ohjaavan opastinryhmän vihreä ei ole tarpeeksi pitkä tulosuunnan mitoitusliikennemäärän välittämiseen. Yhteenkytkentäohjelman 60 sekunnin kiertoaika on liian lyhyt, eikä sitä voitu muuttaa katkaisematta Tuusulanväylän vihreää aaltoa. Vanhan Tuusulantien liittymän välityskyky on tyydyttävä, vaikka liittymän muiden tulosuuntien opastinryhmät saavat tarpeeksi vihreää aamun huipputunnin aikana.

Yleensä on perusteltua ajatella, että alueen sujuvuus paranee, kun yhteenkytkettyihin liikennevaloihin lisätään reuna-alueen erillisohjattu liittymä. Muutoksen jälkeen ajoneuvo pysähtyy kahden liittymän sijaan mahdollisesti vain rajaliittymään, jonka jälkeen ajoneuvo kulkee vihreässä aallossa. Vanhan Tuusulantien liittymän liikennevalojen yhteenkytkentä ei kuitenkaan parantanut testialueen viivytyksiä, sillä erillisohjaus toimi merkittävästi paremmin kuin uusi yhteenkytkentäohjelma. Liittymän yhteenkytkentä paransi odotetusti Itäisen Ohikulkutien liittymässä etelästä pohjoiseen kulkevien ajoneuvojen sujuvuutta. Lopputulos oli, että etelästä pohjoiseen kulkevien ajoneuvojen viivytykset kasvoivat ja muiden tulosuuntien viivytykset eivät muuttuneet merkittävästi.

Liittymäkohtaisesti Vanhan Tuusulantien viivytykset kasvoivat uuden valo-ohjelman takia. Myös pysähtyvien ajoneuvojen osuus oli nykyistä tilannetta huonompi, vaikka ai-noastaan etelästä pohjoiseen menevät ajoneuvot pysähtyivät enemmän uuden ohjelman aikana. Itäisen ohikulkutien liittymässä sujuvuus parani etelästä tulevilla ajoneuvoilla. Muuten sujuvuuden muutokset liittymässä olivat vähäisiä, kuten myös Haukantiellä, mikä oli oletettavaa vähäisten ohjelmamuutosten takia. Sivusuuntien oikealle kääntyvien opastinryhmien vihreän pidennykset eivät vaikuttaneet tulosuuntien ajoneuvojen viivytyksiin.

Tuusulanväylän liikennevalojen yhteenkytkentä jatkuu testialueen pohjoispuolelle. Kuitenkin, liikennevalosuunnitelmassa huomioitiin vain testialueen liittymät. Haukantien liittymän valo-ohjauksen ajoitukset eivät mukaile todellisen tilanteen ohjausta, mutta ajoneuvot syötetään malliin todellisen tilanteen mukaan. Ajoneuvot saapuvat pohjoisesta yleensä jonossa, sillä alueelle saavutaan valo-ohjauksisesta liittymästä. Todellisessa tilanteessa suurin osa ajoneuvoista jatkaa vihreässä aallossa pysähtymättä Haukantien liittymään. Simulointimallissa Haukantien liittymän valo-ohjaus voi olla eri tahdissa kuin todellinen valo-ohjaus ja tulosuunnan opastinryhmä saattaa näyttää punaista jonon saapuessa liittymään. Tapaustutkimuksessa voidaankin olettaa, että pohjoisesta tulevien ajoneuvojen viivytykset ovat simulointituloksia pienemmät. Jos kokesimulaattorit saadaan samaan vaiheeseen todellisten kojeiden kanssa, simulointi antaa todellisemmän kuvan myös Haukantien liittymän viivytyksistä

Testialueen onnettomuuksista suurin osa tapahtui Itäisen Ohikulkutien läheisyydessä, jossa yleisimmät onnettomuustyytit olivat peräänajo ja risteämisonnettomuudet. Risteämisonnettomuuksista suurin osa oli etelästä tulevien ja sivusuunnasta kääntyvien ajoneuvojen välillä, mikä viittaa ajoneuvojen ajaneen liittymäalueelle punaisen aikana. Jos suunniteltu yhteenkytkentä toteutetaan, myös eteläisestä tulosuunnasta tulevista ajoneuvoista suurin osa pääsuunnan ajoneuvoista saapuu Itäisen Ohikulkutien liittymään vihreän aikana ja testialueen liikenneonnettomuudet saattavat vähentyä.

7.2.2. Valo-ohjelmien jatkokehittäminen

Liikennevalosuunnitelmasta saadaan kokonaisvaltaisempi selvitys, jos suunnitelmaan lisätään muut Tuusulanväylällä sijaitsevat yhteenkytketyt liittymät. Tällöin Vihreän aallon toteutuminen väylällä voidaan suunnitella uudestaan. Esimerkiksi valo-ohjelman kiertoaikaa voidaan muuttaa, mikä nykyisessä liikennevalosuunnitelmassa ei onnistunut. Laajempi liikennevalosuunnitelma voidaan toteuttaa, jos nykyisen testialueen ulkopuolisiin liittymiin lisätään MDSL-yksiköt. Myös liikenneverkkomalli on päivitettävä uuden alueen mukaiseksi.

Vaikutusarvioinnin luotettavuutta voidaan parantaa simuloimalla uusien valo-ohjelmien aikainen liikennetilanne, kun alueella toteutuu sille ominainen liikennemäärä. Poikkeustilanteen kuten kesälomakauden aikana tehty viivytystutkimus ei tuota välttämättä todenmukaisia tuloksia.

Alueen valo-ohjausta voidaan kehittää suunnittelemalla aamun liikenteelle oma valo-ohjelma. Liikennemäärä vähenee aamun tilanteesta huomattavasti, mutta nykyisin valo-ohjaus toteuttaa samaa ohjelmaa sekä aamulla että päivällä. Simulointijärjestelmän avulla voisi testata nykyistä pidemmän kiertoajan vaikutuksia aamuliikenteessä.

LÄHTEET:

Ala-Mutka K., Rintala M., Savikko V., Palviainen J. (2002). *Tietotekniikan peruskurssi*. (Online, viitattu 12.12.2003) <http://www.cs.tut.fi/etaopetus/titepk/> Kappale 19.2

Al-Mudhaffar A. (1998). *Effektivisering av LHOVRA Signalstyrning i Krosningen Stockhomsvägen–Sandavägen*. Kungl Tekniska Högskolan, Institutionen för Infrastruktur och Samhällsplanering. Nr 90-88. Stockholm. 60 s.

Bargiela A. (1997). *DIME – Distributed Memory Environment for Transport Telematics Applications*. (online, viitattu 18.2.2004). <http://www.doc.ntu.ac.uk/RTTS/Projects/dime/project.html>

Chrobok R., Kaumann, O., Wahle, J., Schreckenberg, M. (2001). *Three Categories of Traffic Data: Historical, Current and Predictive*. Control in transportation system 2000: a proceeding volume from the 9th IFAC Symposium, Braunschweig, Saksa. Vol. 1. s. 221–226.

Esser J., Schreckenberg M. (1997). *Microscopic Simulation of Urban Traffic Based on Cellular Automata*. International Journal of Modern Physics C, Vol 8, No. 5. World Scientific Publishing Company. ss 1025–1036.

FINNET-liitto (Puhelinlaitosten Liitto r.y.). (1991). *Telesanasto*. ISBN 951-95567-8-8. Puhelinlaitosten Liitto r.y.

Hassinen M. (2004). *Verkko-ohjelmointi*. (online, viitattu 8.6.2004). <http://www.cs.uku.fi/~mhassine/VOH/Luennot/lu3.html>

Kosonen I., Davidsson F. (1994). *Evaluation and testing of SPOT and SOS-II control strategies using HUTSIM simulator*. Seventh International Conference on Road Traffic Monitoring and Control. IEEE conference publication number 391. s. 60-63.

Kosonen I. (1996). *HUTSIM – Simulation Tool for Traffic Signal Control Planning*. Helsinki University of Technology, Transportation Engineering, Publication 89. Otaniemi. 121 s.

Kosonen I., Bargiela A., Claramunt C. (1999). *A Distributed Traffic Monitoring and Information System*. Proc. European Simulation Symposium, ESS '98, ISBN 1-156555-147, s. 355-361.

Kosonen I. (1999). *HUTSIM – Urban Traffic Simulation and Control Model: Principles and Applications*. Teknillinen korkeakoulu, Liikennetekniikka, Julkaisu 100. Otaniemi. 247 s.

Kosonen I. Bargiela A. (2000). *Simulation based traffic information system*. 7th World Congress on Intelligent Transport Systems. November 6–9, 2000. Turin, Italy.

Kosonen I. (2003a). *DigiTraffic*. (online, viitattu 10.3.2004). <http://www.hut.fi/~ikosonen/DIGITRAFFIC/>

Kosonen I. (2003a). *Multi-Agent Fuzzy Signal Control Based on Real-Time Simulation*. Transportation Research, Part C. Vol. 11C, No. 5, October 2003. s. 389–403.

Kosonen I. (2003c). *Liikenteen simulointi -kurssin luentokalvot, kevät 2003*. (online, viitattu 15.10.2003). <http://www.hut.fi/Yksikot/Liikenne/Opinnot/148/>

Kronborg P. (1992). *MOVA and LHOVRA Traffic Signal Control for Isolated Intersections*. TFK report 1992:4E. TFK – Transport Research Institute, Stockholm. 57 s.

Kronborg P. Davidsson F. (2000). *Improvements for Scandinavian SPOT urban traffic signal control system*. TFK report 2000:4E. TFK – Transport Research Institute, Stockholm. (online, viitattu 4.6.2004) http://www.tfk.se/publik/2000_4E.pdf 18 s.

Law K., Kelton W. (2000). *Simulation Modeling and Analysis*. International Edition 2000. ISBN 0-07-116537-1. McGraw-Hill Education, Asia. 759 s.

Leon-Garcia A., Widjaja I. (2003). *Communication Networks*. International Edition 2003. ISBN 0-07-242349-8. (tilatessa käytä ISBN 0-07-123026-2) McGraw-Hill Education, Asia. 867 s.

Luttinen T. (1983). *Alueellinen liikenteen valo-ohjaus ja sen sovellus Lahden kaupunkiin*. Diplomityö, Liikennetekniikka, Teknillinen Korkeakoulu. s. 154.

Luttinen T. (1992). *Valo-ohjauksen tekniikka ja järjestelmät*. Liikenteen ohjaus, 10–12.1992, Kaupunkiopisto.

Luttinen T. (1994). *Liikennetieto-ohjaus keskusta-alueilla*. Tie ja liikenne '94, Suomen Tieyhdistys. s. 11–16.

Luttinen T. (1996). *Statistical Analysis of Vehicle Time Headways*. Teknillinen korkeakoulu, Liikennetekniikka, Julkaisu 87. Otaniemi. 193 s.

Luttinen T., Nevala R. (2002). *Capacity and Level of Service of Finnish Signalized Intersections*. Tiehallinto, Finnra Reports 25/2002. 160 s.
http://www.tiehallinto.fi/s12/htdocs/photo/julkaisut/3200757e_capacity_and_level.pdf

Luttinen T. (2002). *Uncertainty in Operational Analysis of Two-Lane Highways*. Transportation Research Record 1802, Paper No. 02-3705. s 105–114.

Mullins J. (2004). *Bad Driving the secret of traffic forecast*. (Online, viitattu 4.8.2004)
<http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns99996094>

Niinimäki M., Raisamo R., Mykkänen J. (1999). *Tietoverkkojen peruskäsitteet*. (Online, viitattu 12.12.2003) <http://www.cs.uta.fi/~rr/tvpk/tvpk1.pdf>

Nokela I., Lyly S., Aho E. (1980). *Liikennetekniikan sanasto*. Helsingin teknillinen korkeakoulu, Liikennetekniikka, Julkaisu 45. Otaniemi. 298 s.

Nykänen O. (2003). *XML-peruskurssi*. (Online, viitattu 23.2.2004)
<http://www.w3c.tut.fi/training/2003/0219-xml-1/index.html>

Peek Traffic (2002). *Euro Controller EC-1 Käyttäjän käsikirja Ver. 1.30*. Peek Traffic Oy, Helsinki. 72 s.

Peek Traffic (2003a). *Integrated Urban System – OmniVue 2003*. Peek Traffic Oy, Helsinki. 4 s.

Peek Traffic (2003b). *Euro Controller EC-1 Parameter Manual*. Peek Traffic AB, Stockholm-Globen Sweden. 229 s.

Peuhkuri M. (2002). *Internet Traffic Measurements – aims, methodology and discoveries*. Helsinki University of Technology (Online, viitattu 18.12.2003)
<http://keskus.hut.fi/u/puhuri/publications/li.pdf>

Pursula M. (1990). Liikenteen ohjauksen ajattelutavan kehitys. Lainattu liikenteen ohjaus -kurssin opetusmonisteesta, 2001. Teknillinen korkeakoulu, Liikennetekniikka, opetusmoniste. Otaniemi. s. 1–5.

Rintala M. (2001). *TCP/IP*. (Online, viitattu 15.12.2003)
<http://koti.mbnet.fi/mrin/paattotyö/liite1.html>

Saint-Andre P. (2004). *Extensible Messaging and Presence Protocol (XMPP): Core draft-ietf-xmpp-core-22*. (Online, viitattu 23.2.2004)
<http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-xmpp-core-22.txt>

Sane K. (1990). *Liikenteen ohjauksen logiikka ja ohjauselementit*. Lainattu liikenteen ohjaus -kurssin opetusmonisteesta, 2001. Teknillinen korkeakoulu, Liikennetekniikka, opetusmoniste. Otaniemi. s. 6–10.

Sane K., Kosonen I. (1996). *HUTSIM 4.2 Reference Manual*. Teknillinen korkeakoulu, Liikennetekniikka, Julkaisu 90. Otaniemi.

Tepa (2003). *Internet*. (Online, viitattu 12.12.2003)
<http://www.otalib.fi/tkk/tepa/index.html>

Tiehallinto (1996). *LIVASU 1995 liikennevalot*. Tielaitos, Kehittämiskeskus. Suunnitelua ohjaavat julkaisut, liikennetekniikka. Oy Edita Ab. Helsinki. 210 s.
http://www.tiehallinto.fi/thohje/pdf2/liikennevalot_livasu_95.pdf

Tiehallinto (2001a). *Tasoliittymät*. Tiehallinto, Tie- ja liikennetekniikka, Helsinki. 95 s.

Tiehallinto (2001b). *Liikenteen seurannan valtakunnallinen esiselvitys*. Tiehallinnon selvityksiä 19/2001. Tiehallinto, Liikenteen palvelut. Helsinki. 55 s.

Verkossa (2003). *Mikroprosessori*. (Online, viitattu 28.11.2003)
<http://www.verkossa.net/sanasto/?tid=55>

LIITE 1

Järjestelmän testauksen tulokset

Integroidun simulointijärjestelmän (hutsim) testausta varten laskettiin todellinen liikennemäärä (video) ja vertailtiin tuloksia myös Tiehallinnon laskentajärjestelmän (det) liikennemääriin.

		det	video	hutsim	video- det	hutsim- det	video- hutsim
15	0-2	38	17	17	-21	-21	0
	2-4	38	34	33	-4	-5	1
	4-6	38	29	26	-9	-12	3
	6-8	38	37	40	-1	2	-3
	8-10	37	36	34	-1	-3	2
	10-12	36	33	33	-3	-3	0
	12-14	36	37	35	1	-1	2
	14-16	39	42	41	3	2	1
	16-18	42	42	40	0	-2	2
	18-20	42	42	42	0	0	0
	20-22	42	31	32	-11	-10	-1
	22-24	42	39	39	-3	-3	0
	24-26	42	42	38	0	-4	4
	26-28	42	36	35	-6	-7	1
	28-30	40	37	37	-3	-3	0
	30-32	44	36	36	-8	-8	0
	32-34	44	33	34	-11	-10	-1
	34-36	44	39	36	-5	-8	3
	36-38	44	46	50	2	6	-4
	38-40	44	48	42	4	-2	6
	40-42	44	40	39	-4	-5	1
	42-44	43	39	36	-4	-7	3
	44-46	40	46	45	6	5	1
	46-48	38	34	33	-4	-5	1
	48-50	38	38	38	0	0	0
	50-52	37	40	38	3	1	2
	52-54	36	42	40	6	4	2
	54-56	36	40	36	4	0	4
	56-58	36	41	42	5	6	-1
	58-60	36	47	43	11	7	4
16	0-2	44	36	36	-8	-8	0
	2-4	44	49	47	5	3	2
	4-6	44	40	43	-4	-1	-3
	6-8	44	45	43	1	-1	2
	8-10	42	33	31	-9	-11	2
	10-12	42	39	39	-3	-3	0
	12-14	42	38	39	-4	-3	-1
	14-16	43	50	50	7	7	0
	16-18	44	46	43	2	-1	3
	18-20	44	50	47	6	3	3
	20-22	44	49	48	5	4	1
	22-24	44	39	40	-5	-4	-1
	24-26	42	42	39	0	-3	3
	26-28	42	46	44	4	2	2
	28-30	42	44	44	2	2	0
		det	video	hutsim	video-	hutsim-	video-

					det	det	hutsim
16	30-32	40	48	45	8	5	3
	32-34	40	44	44	4	4	0
	34-36	40	38	39	-2	-1	-1
	36-38	40	44	43	4	3	1
	38-40	40	37	37	-3	-3	0
	40-42	40	37	35	-3	-5	2
	42-44	38	49	49	11	11	0
	44-46	37	44	41	7	4	3
	46-48	36	39	40	3	4	-1
	48-50	34	38	38	4	4	0
	50-52	34	37	36	3	2	1
	52-54	34	38	38	4	4	0
	54-56	34	49	46	15	12	3
	56-58	34	42	41	8	7	1
	summa	2364	2373	2315	9	-49	58
	keskiarvo				0,30	-1,63	1,93
erotus vi- deo-X	9		58				
erotus det- X		-9	49				

LIITE 2

Integroidun simulointijärjestelmän käyttöohjeet

Järjestelmän käyttöohjeet

Integroidun simulointijärjestelmän tarvittavat alkutiedot tallennetaan tekstitiedostoihin. Liikenteen simuloimiseen tarvitaan liikenneverkkomalli ja useita tekstitiedostoja, joiden avulla määritetään mitä mallinnetaan. Tiedot syötetään muuttujien arvoiksi joko suoraan tiedostoon tai editorin avulla kuten tavallisessa itsenäisesti toimivassa simulointitapauksessa. Kojesimulaattorissa parametrien arvot syötetään Parameter Tool -ohjelmiston avulla, jonka muodostama elc.dat -tiedosto tallennetaan kojiesimulaattorille tarkoitettuun hakemistoon. Liikennesimulointiohjelmisto tallentaa annetut alkuarvot järjestelmäänsä ennen simuloimista ja käyttää niitä simuloinnin aikana. Ohessa selvitetään yksityiskohtaisesti tekstitiedostojen sisällöt sekä huomioitavat asiat, jotta järjestelmä ei kaadu simuloinnin aikana, ja simuloinnista saadut tulokset ovat päteviä.

Kaikkia HUTSIMiin määritettyjä lähtötietoja ei tarvita integroidussa simulointijärjestelmässä, sillä järjestelmä tuottaa itse osan tiedoista simuloinnin aikana. Tarvittavat liikennesimulointiohjelmiston tiedostot ovat liikennemalli (*.cnf), aloitustiedosto (*.ini) ja ajotiedosto (*.bat). Liikenneverkkomallin aluekojeoliolle ja liittymäkohteille kojeolioille määritetään omat ajoitustiedostonsa (*.sig). Niissä ei ole valo-ohjauksen parametreja, sillä EC-1 kojiesimulaattori tuottaa järjestelmän valo-ohjauksen. Tiedostot ovat kuitenkin tarpeellisia, sillä osa kojeiden perusmuuttujien arvoista saadaan ajoitustiedostosta. Ilman kyseisiä tiedostoja ohjelma ei toimi.

Liikenneverkkomalli piirretään graafisella HUTEDI-editorilla kuten yleensä HUTSIM-mallit. Mallin tietoja voidaan myös muokata tekstieditorilla, jossa on määritetty mallissa olevien olioiden sijainti ja muuttujien arvot. Mallin hahmottaminen ainoastaan tekstitiedoston avulla on hankalaa, ja siksi suositellaan käytettäväksi pääsääntöisesti graafista käyttöliittymää. HUTSIMia kehitettäessä muuttujia on voitu lisätä ilman HUTEDIn päivitystä, jolloin lisättyjen muuttujien arvot tallennetaan järjestelmään tekstieditorin avulla.

Tekstitiedoston käyttö perustuu erilaisten olio-tyyppien omiin tunnistenumeroihin, joiden avulla erityyppiset oliot erotetaan toisistaan. Oliotyyppin numero näkyy HUTEDIn käyttöliittymässä Obj-tekstikentässä. Järjestelmässä yleisimmin käytettyjen oliotyyppien numerot on lueteltu oheisessa taulukossa.

Taulukko 2-1. Yleisimmin käytettyjen oliotyyppien tunnistenumerot tekstieditorissa.

Tunnistenumero	Oliotyyppi
10	dummy ajoputki
11	ajoneuvon ajoputki
21	ajoneuvon generaattori
23	ajoneuvon destinaattori
31	graafinen viiva
33	teksti
43	liikennetieto-ohjattu opastin
74	ajoneuvoilmaisoin, jolla ilmaisilogiikka
94	liittymäkohtainen koje (toteuttaa vaiherinkiä)
96	aluekoje

HUTEDI toteuttaa mallissa olevien olioiden yksilöllisen tunnistenumeroinnin, jonka perusteella HUTSIM tunnistaa eri oliot simuloinnin aikana. Jos käyttäjä poistaa mallin tekstitiedostosta olion, järjestelmän tunnistenumerointi on epäjatkuvaa, eikä malli toimi. Tästä syystä tekstitiedostoa kannattaa käyttää ainoastaan olion muuttujien muokkaamiseen.

Tekstieditorissa olion muuttujien arvot määritetään juoksevan rivinumeroinnin avulla. Jokainen muuttujan arvo on omalla rivillä. Olion määrittäminen aloitetaan oliotyyppitunnistenumorilla, jolla ei ole rivinumeroa. Oliot erotetaan toisistaan nollarivillä. Samantyyppisillä olioilla ovat identtiset muuttujien rivinumerot. Ohessa on esimerkki ilmaisinaliosta, joka toteuttaa ilmaisilogiikkaa. Sen oliotyyppinumero on 74.

```

74
1 504
2 -2005 233 -2005 223
3 5.00
4 4.00
21 5
22 5;
23 0
24 0
25 0
26 0
27 0
28 0
30 0
29 0
31 0
32 1
41 1
42 216
0

```

Kuva 2-1. Olion tiedot tekstimuodossa.

Integroidussa simulointijärjestelmässä liikenneverkkomallin opastimien (*signal head*) on oltava liikennetieto-ohjattu (*Actuated*), jolloin niiden oliotyyppitunnistenumero on 43. Opastinoliot voidaan yhdistää use-

LIITE 2

Integroidun simulointijärjestelmän käyttöohjeet

ampaan samansuuntaiseen ja -pituiseen ajoputkeen, jolloin valojen ohjaus vaikuttaa näissä putkissa kulkeviin ajoneuvo-olioihin. Opastimen sijainti (*Posit*) määritetään sen etäisyydellä ajoputken päästä, mikä määrittää myös pysäytysviivan paikan ajoneuvo-olioille. Kun koje yhdistetään liittymän opastimiin, annetaan näille opastinryhmänumerot, joiden perusteella koje yksilöi opastimet. Yksilöivä numerointi aloitetaan numerosta yksi ja päätetään liittymässä olevien opastimien lukumäärään. Yhdistäminen kannattaa tehdä siinä järjestyksessä kuin opastimet on järjestetty kokesimulaattorissa, jolloin HUTSIMin ja kokesimulaattorin välisen yhteyden konfigurointi on helpompaa.

Mallissa olevien ilmaisimien tyyppi on ilmaisilogiikka (*DetLogic*), jonka oliotyyppitunnistenumero (*Obj*) on 74. Kuten opastimet myös ilmaisimet yhdistetään vähintään yhteen ajoputkeen. Ilmaisinaliolla on sijainti (*Posit*) ja pituus- (*Length*) muuttujat, joiden annetut arvot päivittyvät liikenneverkkomalliin tallennuksen yhteydessä. Kun koje yhdistetään ilmaisimeen, määritetään ilmaisilogiikkakoodi, joka yksilöi ilmaisinaliot kojeelle. Ilmaisimien numerointi toteutetaan samoilla ehdoilla kuin opastimien numerointi.

Mallin jokaiseen liittymään sijoitetaan oma valo-ohjauskoje, jonka tyyppi (*ontroller type*) on vaiherinki (*phase ring*), ja ohjauksen tila (*control mode*) on aikavälin etsintä (*gap seeking*). Vaiherinkityyppiä olevan kojeen oliotyyppitunnistenumero (*Obj*) on 93. Kojelle määritetään oman ajoitustiedoston nimi, joka voi johdonmukaisesti olla esimerkiksi kojeen tunnistenumero. Nimen päätteeksi tulee sig. Muita liittymäkohtaisen kojeen muuttujien arvoja ei muuteta HUTEDissa, mutta sen avulla yhdistetään koje liittymän opastimiin ja ilmaisimiin.

Kojeen tunnistenumeron on oltava sama kuin sitä vastaavan EC-1 kokesimulaattorin numero. Nykyisessä järjestelmässä kokesimulaattoreiden tunnisteen on oltava viisinumeroinen. Koska HUTEDissa kojeelle ei voi antaa kuin kolmenumeroinen tunnistenumero (*ContNo*), numerointi on tehtävä tekstieditorin avulla. Mallin tekstieditorissa muuttujan rivinumero on 25.

Liittymäkohtaisten kojeiden lisäksi liikenneverkkomalliin lisätään vielä aluekoje (*Area Control*). Sen tyyppitunnistenumero on 96. Aluekojeelle ei anneta ohjauksen tilaa (*Off*). Se yhdistetään liittymäkohtaisiin kojeisiin, jolloin se saa kojeiden enimmäismääräksi (*MaxContr*) mallissa olevien liittymäkohtaisten kojeiden lukumäärän. Aluekojeolion muiden muuttujien arvoja ei muuteta HUTEDissa.

Aluekoje yhdistetään mallin syöttöpisteoloihin, jotta ajantasainen liikennetiedon mukaisesti ajoneuvo-oliot syötetään oikeista syöttöpisteistä. Yhdistämisessä käytetään tekstieditoria. Syöttöpisteiden enimmäislukumäärän rivinumero on 45 ja niiden yksilölliset HUTEDin määräämät tunnistenumerot (*Id*) kirjoitetaan riville 46. Tunnistenumeroihin tulee välilyönti. Jos kyseiset rivinumerot puuttuvat tekstieditorista, lisätään rivinumerot oikeaan paikkaan ja annetaan muuttujille arvot. Aluekojeen tekstitiedoston nimi määritetään tekstieditorin avulla rivillä 21. Nimen perään laitetaan kaksoispilkku.

Muut mallin oliot, kuten ajoputket, generaattorit ja destinaattorit toteutetaan kuten tavallisesti. Syöttöpisteille annetaan malliin syötettävien ajoneuvojen tavoitenopeusjakauma. Jakauman keskiarvo voi olla alueen nopeusrajoitus, jos tarkempaa mitattua jakaumaa ei ole tiedossa. Lopuksi mallin osat yhdistetään toisiinsa ja tehdään tarvittava putkien reititys.

Kun HUTSIM-ohjelmisto on Linux-käyttöjärjestelmässä, mallissa määritettyjen tiedostojen nimet on tarkistettava tekstieditorin avulla. HUTEDI-editorissa kirjaimet voivat muuttua isoiksi kirjaimiksi ohjelmiston tallentaessa tietoja tekstieditoriin. Unix-käyttöjärjestelmässä isoilla ja pienillä kirjaimilla on merkitystä, joten Linux ei löydä tiedostoa ellei hakemistossa olevan tiedoston nimi ole täysin identtinen mallissa määritetyn nimen kanssa.

Mallin välimatkat toteutetaan todellisen liikennealueen mukaisesti. Kääntyvien kaistojen pituudet ja ilmaisimien sijainnit tulee mitoittaa oikein. Tarkat mitat saadaan muun muassa liikennevalosuunnitelmakartasta, jossa mittakaava on pieni ja tarvittava laitteisto sijoitettu oikeille paikoille. Mallin luettavuutta voidaan parantaa kirjoittamalla liittymien kohdalle niihin liittyvien teiden tai katujen nimet ja lisäämällä opastimien viereen nuolet osoittamaan, mitkä opastimista on tarkoitettu suoraan ajaville ja mitkä kääntyville ajoneuvoliioille.

Kun malli on saatu valmiiksi, ennen simuloimista on määritettävä muiden tekstitiedostojen sisällöt. Tiedostojen pohjana suositellaan käytettäväksi vanhaa tekstitiedostoa, josta muutetaan tarvittavat kohdat. Aloitustiedostossa määritetään miten malliin syötetään ajoneuvo-oliot. Tiedoston riville 111 annetaan syöttötietotyyppi luku nolla, jolloin HUTSIM ei syötä ajoneuvoja esimerkiksi sisäisen jakauman perusteella. Riville 150 sijoitetaan kokesimulaattorin IP-osoite ja riville 151 määritetään HUTSIMiin yhdistetyn valo-ohjausjärjestelmän tyyppi, joka tässä tapauksessa on 5 eli EC-1 kokesimulaattorin tyyppi. Riville 153 määritetään kuinka usein HUTSIM yrittää uudelleen viestintäyhteyden avausta, jos sen verkkoyhteys on katkenut. Muuttujan yksikkö on millisekuntia. Kun rivillä 155 oleva luku on 1, ohjelma toteuttaa ajantasaisen (*online*) tiedon käsittelyyn tarvittavat algoritmit. Jos luvun arvo on nolla tai rivi on poistettu aloitustiedostosta, ohjelma toteuttaa tavallista simulointia ilman ajantasaisen viestinnän verkkorajapintaa. Jos jotain edellä mainituista rivinumeroista ei löydy aloitustiedostosta ja Integroidun järjestelmän verkkorajapinta halutaan toteuttaa, puuttuva tieto lisätään oikeaan paikkaan. Aloitustiedoston sisältö on muuten sama kuin tavallisessa simuloinnissa. Testauksessa käytetty aloitustiedosto on esitetty liitteessä 3.

Liittymäkohtaisten kojeiden tekstitiedostossa on kojeen perusparametreja. Rivillä 101 on kojetyyppi. Rivillä 104 on liittymässä olevien opastimien lukumäärä. Mallissa olevien ilmaisimien määrä on määritetty rivillä 105. Viimeinen perusmuuttuja on kokesimulaattorin ilmaisilogiikan suurin järjestysluku. Se on rivillä 108.

LIITE 2

Integroidun simulointijärjestelmän käyttöohjeet

```
1244 HUTSIM PHASE CONTROL TIMING FILE *** PRES5A.SIG ***
100 BASE PARAMETERS
100 -----
101 10 Control Mode
104 5 Number of Signal Groups
105 5 Number of Detector Logics
108 7 Number of Real Detector Logics
100 DETECTOR LOGIC PARAMETERS
100 1 2 3 4 5
100 -----
746 1 2 3 4 7 detector logic number Peek
1000 END OF TIMING FILE
```

Kuva 2-2. Liittymäkohtaisen kojeen tekstitiedosto.

Kehitetyssä järjestelmässä kojetyyppi on 10, joka tarkoittaa, että valo-ohjaus tulee erilliseltä kokesimulaattorilta. Koska HUTSIM-mallissa ilmaisilogiikkajärjestys voi erota EC-1 kokesimulaattorin ilmaisilogiikkajärjestyksestä, määritetään rivillä 746 simulaattorien väliset ilmaisinnumeroiden vastaavuudet. Ne luetaan HUTSIMin ilmaisilogiikkajärjestyksessä. HUTSIM-mallia tehdessä liittymäkohtainen kojeolio kannattaa yhdistää ilmaisimiin kokesimulaattorin ilmaisilogiikkajärjestyksessä, jolloin tekstitiedoston vastaavuudet on helppo toteuttaa. Joskus mallinnettavalla alueella ilmaisilogiikoita on enemmän kuin mallissa ilmaisimia. Edellä esitetyssä kojeen tiedostoesimerkissä viidennen ilmaisimen todellinen ilmaisilogiikkakomponentti on 7. Koska HUTSIMissa ilmaisimien numerointi on tehtävä järjestyksessä alkaen luvusta yksi, esimerkissä todellisten ilmaisimien määräksi on merkitty seitsemän ja mallissa olevien ilmaisimien määräksi viisi. Rivillä 746 viidennen ilmaisimen kokesimulaattorilogiikan numero on seitsemän.

Aluekojeen ajoitustekstitiedostossa yhdistetään mallin generaattorin tunnistenumero maastossa olevan ilmaisimen ilmaisilogiikkakomponenttiin. Rivillä 201 ilmoitetun tunnistenumerojärjestyksen mukaan riveillä 202 ja 203 annetaan todellisten kojeiden tunnistenumerot ja ilmaisimien ilmaisilogiikkakomponentit. Järjestelmän kaikissa ohjelmistoissa liittymäkohtaisen kojeen tunnistenumeron on oltava sama. Tällä hetkellä kokesimulaattorissa tunnistenumero on viisinumeroinen, mikä määrittelee järjestelmässä olevien kojeiden tunnistenumerot. Riveillä 251 ja 252 on ajantasaisen verkkojärjestelmän IP-osoite ja porttinumero. Osoitteen ja porttinumeron perään laitetaan puolipiste ohjelmiston lukualgoritmia varten.


```

1244 HUTSIM PHASE CONTROL TIMING FILE *** PRES5A.SIG ***
100 -----
100 GENERATOR PARAMETERS FOR ON-LINE SIMULATION
100 -----
200 10 max number of generators
201 11 12 21 22 31 32 41 42 51 52 gen_id
202 90010 90010 90030 90030 90010 90010 90020 90020 90030 90030 con_id
203 11 13 13 12 8 10 10 13 8 10 det_log_nro
100 NETWORK PARAMETERS FOR ON-LINE SIMULATION
100 -----
250 1
251 127.0.0.1;
252 1812;
100 -----
1000 END OF TIMING FILE

```

Kuva 2-3. Aluekojeen tekstitiedosto.

Kojesimulaattorille annetaan valo-ohjausparametrien arvot elc.dat-tiedostoon ennen simuloimista. Kojesimulaattorin ohjelmointi toteutetaan kuten määritetään todellisen kojeen valo-ohjelmat. Ainoa poikkeus on ilmaisinkanavanumerot (*inp. No*), jotka simulaattorissa ovat samat kuin ilmaisilogiikkakanumerot. Todellisessa kojeessa kanavanumerointiin vaikuttaa ilmaisimien ja kojeiden välisten kaapeleiden liitos kojeeseen.

Peek Trafficin (2003b) julkaisemassa EC-1 Parameter Manual –käsikirjassa on ohjeet kuinka kojeeseen ohjelmoidaan suunnitellut valo-ohjelmat. Ohjelmoinnissa käytetään useita satoja parametreja, joiden selitykset ovat parametrien käsikirjassa.

Ennen kuin liikenteen simulointi aloitetaan HUTSIMilla, kojiesimulaattorin rajapinnalle eli TrafficSimInterface-ohjelmalle annetaan järjestelmän kojetunnistenumero. HutsimTest-ohjelmassa yhdistetään kojiesimulaattoreiden tunnistenumero kojeiden ja liikennesimulointiohjelmiston rajapintaohjelmaan. HutsimTest-ohjelman ControllerId:n arvoksi asetetaan simuloitavan kojeen tunnistenumero, joka on ilmoitettu kojiesimulaattorin Communication-ikkunan SrchObj-tekstikentässä. Numeron eteen laiteen 9 ja niin montta nollaa kunnes tunnistenumero on viisinumeroinen. Testiohjelma ottaa yhteyden TrafficSimInterface-ohjelmaan Connect-painikkeen avulla.

Seuraavaksi yhdistetään kojiesimulaattori WSI-palvelimeen. Yhdistäminen tehdään Communication-ikkunassa olevan Connect-painikkeen avulla. HutsimTest-ohjelmassa aloitetaan kojeen Grint-viestien lähetys rajapintaohjelmaan painamalla start-painiketta. Jos yhteyden tarvitsemat tiedot on asetettu oikein ja rajapintaohjelman LofActive on valittuna, TrafficSimInterface-tekstikentään ilmestyvät kojeilta saapuvat Grint-viestit.

Jos viestien lähetystä ei aloiteta HutsimTestin avulla, TrafficSimInterface-ohjelmassa olevat Grint-viestin start- ja stop-painikkeet eivät toimi. Kun yhteydenmuodostusoperaatio on tehty kaikkien simuloitavien kojeiden tunnistenumeroille, HutsimTest voidaan sulkea, eikä ohjelmaa saa käyttää varsinaisen simuloinnin aikana. Oheisessa taulukossa on tiivistelmä kojiesimulaattorille tehtävistä toimenpiteistä, jotka tulee suorittaa ennen simuloinnin aloittamista.

LIITE 2

Integroidun simulointijärjestelmän käyttöohjeet

Taulukko 2-2. Kojesimulaattorin tietoliikenneyhteyden avaus.

1. Käynnistä WSI-palvelin pikakuvakkeesta
2. Käynnistä TrafficSimInterface- ja HutsimTest-ohjelmat
3. Käynnistä kojiesimulaattori ja yhdistä se WSI-palvelimeen
4. Tarkista kojiesimulaattorin tunnistenumero SrchObj-tekstikentästä
5. Vaihda tarvittaessa HutsimTestissä olevan ControllerID:n tunnistenumero
6. Avaa HutsimTestin yhteys painamalla Connect-painiketta
7. Aloita Grint-viestien lähetys HutsimTestissä olevan Start-painikkeen avulla
8. Sulje HutsimTestin yhteys painamalla Disconnect-painiketta
9. Toteuta vaiheet 3–8 jokaiselle järjestelmän kojiesimulaattorille
10. Aloita liikennesimulointi (HutsimTest-ohjelma voidaan sulkea)

Simulointiajon alussa HUTSIM muun muassa muodostaa mallin kuvaruudulle, tallentaa muuttujien arvot järjestelmäänsä eri tekstitiedostoista ja avaa tietoliikenneyhteydet muiden osapuolten kanssa. Kojiesimulaattori ei saa lähettää opastintilaviestejä ennen kuin aloitusvalmistelut HUTSIMissa on tehty. Muuten HUTSIM kaatuu sen ottaessa yhteyttä kojiesimulaattoriin, josta tulee viestejä jatkuvalla syötteellä kymmenen kertaa sekunnissa. Tästä johtuen kojiesimulaattorin rajapinnan on pystyttävä aloittamaan ja lopettamaan viestien lähetys, vaikka ohjelma jätetään päälle. Kun HUTSIM on valmis simuloimaan, opastintilaviestien lähetys aloitetaan painamalla rajapintaohjelmassa Start-painiketta.

Alkuvalmisteluissa HUTSIM muodostaa tietoliikenneyhteyden kojiesimulaattorin lisäksi myös ajantasaisen liikennetietojärjestelmän kanssa. Kun HUTSIMin aloitusvalmistelut ovat päättyneet, käyttäjä valitsee hiirellä aluekojeen ja vaihtaa kuvaruudun alareunassa olevan onln traf -muuttujan arvoksi ON. Se tehdään viemällä hiiri muuttujan arvon päälle, jolloin hetken päästä muuttuja vaihtuu off-tilasta on-tilaan. Arvon muututtua HUTSIM lähettää start-viestin, jonka jälkeen palvelin aloittaa liikennetietoviestien lähettämisen. Simuloinnin keskeytyksestä HUTSIM vaihtaa onln traf -muuttujan arvoksi OFF. Liikennesimuloinnin keskeytyksestä kojiesimulointiohjelmat eivät pysähdy. Kun simulointia jatketaan, liikennetilanne ei välttämättä ole valo-ohjauksen kanssa samassa vaiheessa, mikä voi aiheuttaa ylimääräisiä viivytyksiä tuloksiin.

Simulointi lopetetaan sulkemalla ensin HUTSIM ja sen jälkeen kojiesimulaattorin ohjelmistot. Jos kojiesimulaattorien rajapintaohjelma suljetaan ennen HUTSIMia, ohjelma kaatuu.

Ajantasainen liikennetietojärjestelmä pidetään aina päällä. HUTSIM suljetaan keskeyttämällä simulointiajo (2), jonka jälkeen voi poistua DOS-käyttöliittymästä (F4) (Sane, Kosonen 1996). Kun liikennesimulointi keskeytetään, HUTSIM lähettää ajantasaiselle liikennetietojärjestelmälle stop-viestin, jonka saatuaan palvelin lopettaa viestien lähetyksen. Seuraavan kerran simulointia aloittaessa ajantasainen järjestelmä on pysähdystilassa eikä se lähetä viestejä ennen kuin käyttäjä on muuttanut aluekojeen onln traf -muuttujan

tilaa. Simuloimisen jälkeen tarkistetaan lokitiedostosta (debug.log), ettei järjestelmän tietoliikenneyhteyksissä ole ollut merkittäviä katkoksia ja analysoidaan tulokset.

LIITE 3 Esimerkki aloitustiedostosta (tuusula.ini)

```

1151 HUTSIM 5.XX Initialization File
101      *.*;           Input File Mask
102      nolla.trf;     Input File
103      0607_1500.arr;  Output File
104      0607_1500.rep;  Report File
105      ;             Default Directory
111      0             Input Mode      off
112      3             Output Mode     arr
113      2             Report Mode     rep
121      0             TimeHour (0-60)
122      35           TimeMin  (0-60)
123      0             NoRepINT (minutes)
124      0             NoGenINT (minutes)
125      15           RepINT (minutes)
131      0             VCOL (vehicle color coding)
132      0             DWIN (downer window mode)
133      1             PLOT (plotter mode)
134      1             PIPE (pipes visible)
135      1             ANIM (animation mode)
136      0             TIME (time update mode)
150      130.233.132.115;
151      5             network mode (Peek mode)
153      500           retry_time (10 ms?)
155      1             online mode (online on)
201      1             Real Time Connection
202      10           Time Step Unit (1/100 s)
203      0             Extra Load (ms)
204      2.00          Low Frequency Warning (Hz)
205      5             Screen Update Interval (sec)
211      3             Graph Time Scale (pixels/second)
212      2             Graph Speed Scale (pixels/unit)
213      0             Graph Display Area (pixels)
221      1             Sound Effects
251      41953         Seed Number (0-63999)
252      1.00          Traffic Scale Factor
253      0.1           Minimum Arrival Time Headway (s)
254      0             Remove Jammed Vehicles
261      6             Max. Group Number
262      1             Max. Report Number
263      2             Stop Criteria (Level number)
264      0.50          Option-Zone Weight (n=1)
265      1.00          Option-Zone Weight (n>1)
266      ,;           Column Delimiter
267      6             Column Spacing
271      0.026         Delay Cost (1/sec)
272      0.180         Stop Cost (1/stop)
273      2.000         Option-Zone Cost (1/veh)
274      10.000        Queue Criteria (dist/m)
301      2.00          Unit Speed Value (km/h)
302      1.20          Following Time Headway (s)
303      20.00         Stable Area Width (s)
304      1.20          Stop Distance (m)
305      0.10          Acceleration Adjustment
308      0.003125      Speed Limit Coefficient
321      300           Max Obstacle Sight (m)
322      300           Max. Vehicle Sight (m)
323      1.00          Maximum Reaction Time (s)
325      0             Observing Mode (0=No Reaction Delay)
326      0             Creeping Mode (0=No Creeping)
327      0.01          Creeping Unstability Factor

```


328	0	Flow Stability (0=Stable, 1=Unstable)															
329	0.000	Red Run Probability															
351	0.70	Left Changing Treshold															
352	0.70	Right Changing Treshold															
353	0.40	Forced Lnc Gap Back Left															
354	0.40	Forced Lnc Gap Front Left															
373	0.40	Forced Lnc Gap Back Right															
374	0.40	Forced Lnc Gap Front Right															
355	10.00	Minimum Time in Lane (s)															
356	1	Lane Switch Allowed															
357	0	Left Handed Traffic															
358	1.10	Voluntary Lnc Gap Back Left															
359	1.10	Voluntary Lnc Gap Front Left															
378	1.10	Voluntary Lnc Gap Back Right															
379	1.10	Voluntary Lnc Gap Front Right															
380	3	Ramp Speed Difference in Speed levels															
381	5	Overtaking Speed Increase in Speed levels															
360	7.50	Speed Loss Threshold (km/h)															
701	0.70	AICC Following Gap															
702	1.00	AICC Stopping Distance															
400	10	Number of Vehicle Types															
100	Normal Deceleration Rate																
401	1.6	1.7	1.2	1.5	1.3	2.1	1.7	1.9	1.9	1.9							
100	High Deceleration Rates																
402	3.2	3.0	2.0	2.6	1.7	3.5	2.9	3.2	3.2	3.2							
100	Normal Acceleration Rates																
403	1.6	1.2	1.0	1.1	1.2	1.8	1.4	1.6	1.6	3.0							
100	High Acceleration Rates																
404	2.2	1.6	1.4	1.5	1.6	2.4	2.0	2.2	2.2	3.5							
100	Vehicle Lengths																
405	4.0	7.0	12.0	18.0	24.0	4.5	3.5	4.0	4.0	2.0							
100	Vehicle Type Distributions																
501	88	4	2	6	0	0	0	0	0	0							
502	92	4	2	2	0	0	0	0	0	0							
503	85	4	11	0	0	0	0	0	0	0							
504	57	21	4	18	0	0	0	0	0	0							
505	87	4	9	0	0	0	0	0	0	0							
506	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0							
507	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0							
508	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0							
509	50	0	0	0	0	0	0	0	0	50							
100	Car-following Gap Distributions, Resolution: 0.1 sec																
820	21	Number of Columns (21..51, The first column is start value 1=0.1 sec)															
801	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0
802	1	0	0	0	0	0	0	0	0	25	50	25	0	0	0	0	0
803	1	0	0	0	0	0	0	0	15	20	30	20	15	0	0	0	0
804	1	0	0	0	0	0	0	10	10	15	30	15	10	10	0	0	0
805	1	0	0	0	0	0	10	10	10	10	20	10	10	10	10	0	0
806	1	0	0	0	0	5	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	0
807	1	0	0	5	5	5	5	10	10	10	10	10	10	5	5	5	5
808	1	5	5	5	5	5	5	10	10	10	10	5	5	5	5	5	5
809	1	5	5	5	5	5	5	15	15	5	5	5	5	5	5	5	5

LIITE 3
Esimerkki aloitustiedostosta (tuusula.ini)

```

100      Desired Speed Level Distributions, Resolution 2.0 km/h
920  21      Number of Columns (21..51, The first column is start value
km/h )
901  20      0      0      0      0      0      0      100  0      0      0      0      0      0      0      0
902  50      0      0      0      0      0      0      100  0      0      0      0      0      0      0      0
903  80      0      0      0      0      0      0      100  0      0      0      0      0      0      0      0
904  20      1      1      2      3      5      10      15      26      15      10      5      3      2      1      1
905  30      1      1      2      3      5      10      15      26      15      10      5      3      2      1      1
906  40      1      1      2      3      5      10      15      26      15      10      5      3      2      1      1
907  50      1      1      2      3      5      10      15      26      15      10      5      3      2      1      1
908  60      1      1      2      3      5      10      15      26      15      10      5      3      2      1      1
909  70      1      1      2      3      5      10      15      26      15      10      5      3      2      1      1
910  80      1      1      2      3      5      10      15      26      15      10      5      3      2      1      1
911  90      1      1      2      3      5      10      15      26      15      10      5      3      2      1      1
912  100     1      1      2      3      5      10      15      26      15      10      5      3      2      1      1
1000      End of Initialization File

```


LIITE 4

Nykyisen valo-ohjauksen simulointitulokset

Ohessa on taulukoitu nykytilanteen sujuvuustarkastelua varten tehtyjen simulointiajojen tulokset. Taulukossa oleva ajoneuvojen määrä (ajon.) on simulointiajon aikana malliin syötettyjen ajoneuvo-olioiden lukumäärä. Simulointiajoissa syötetty liikennemäärä on tallennettu mallinnettavalta alueelta 6.7.2004 ja 7.7.2004. Ensimmäisen päivän liikennetiedoilla tehdyt simulointiajot kestivät 35 minuuttia ja toisen päivän tiedoilla simuloitiin tunnin mittaiset ajot. Poikkeuksena on toisena päivänä kello 13:00 alkanut simulointiajo, jonka pituus oli 40 minuuttia.

6.7.2004		9:00			9:45		
		viivytys sek./ajon.	pysähtyneet %	ajon.	viivytys sek./ajon.	pysähtyneet %	ajon.
Vanha Tuusulantie	A	5,3	22,9	240	5,5	23,4	278
	B	0,5	1,3	376	0,4	1,5	342
	C	26,7	78,6	56	20,8	65,9	44
	D	21,1	79,5	39	22,4	78,0	50
	E	80,3	100,0	3	47,3	100,0	3
Itäinen Ohikulkutie	A	9,5	40,2	189	14,4	56,3	256
	B	2,5	10,1	316	2,3	8,7	288
	C	9,0	29,7	91	8,0	24,7	73
	D	25,9	86,4	88	29,9	93,4	76
	E	16,9	54,5	11	10,7	23,8	21
	F	26,3	65,9	138	27,4	82,1	106
Haukantie	A	0,4	1,1	181	0,7	1,2	252
	B (suor.)	7,6	34,1	355	6,9	30,6	304
	B (käänt.)	15,0	53,8	13	24,3	95,8	24
	C	33,1	94,7	19	12,0	33,3	18
	D	29,0	75,6	45	26,1	85,2	54
	E	36,8	84,8	33	45,6	96,0	25

6.7.2004		10:30			11:15		
		viivytys sek./ajon.	pysähtyneet %	ajon.	viivytys sek./ajon.	pysähtyneet %	ajon.
Vanha Tuusulantie	A	4,8	19,1	319	4,1	14,7	340
	B	0,1	0,0	363	0,3	0,3	383
	C	31,2	85,1	74	22,2	62,3	53
	D	22,8	70,2	47	26,1	83,9	61
	E	57,0	100,0	1	35,0	100,0	1
Itäinen Ohikulkutie	A	10,9	44,2	251	12,0	50,5	283
	B	3,4	14,9	328	2,8	10,7	328
	C	8,3	23,0	113	10,3	29,3	116
	D	26,8	89,7	78	28,6	98,8	85
	E	18,9	57,9	19	18,7	60,0	15
	F	28,1	86,2	109	27,1	79,5	117
Haukantie	A	0,5	1,2	250	0,7	1,8	271
	B (suor.)	6,7	28,3	350	8,4	31,8	358
	B (käänt.)	8,4	20,0	15	10,4	26,9	26
	C	36,3	90,0	20	29,0	100,0	28
	D	29,4	70,2	57	25,4	72,3	47
	E	36,8	93,1	29	40,7	92,5	40

6.7.2004		12:00			12:45		
		viivytys sek./ajon.	pysähtyneet %	ajon.	viivytys sek./ajon.	pysähtyneet %	ajon.
Vanha Tuusulantie	A	4,0	17,2	360	0,8	3,3	391
	B	0,3	0,0	392	5,2	19,6	434
	C	27,5	72,9	70	22,9	53,8	143
	D	27,7	86,0	43	30,8	75,4	61
	E	49,0	100,0	1	61,4	100,0	5
Itäinen Ohikulkutie	A	6,3	45,5	288	12,2	46,9	352
	B	3,5	16,7	347	3,1	12,3	342
	C	9,8	32,7	113	9,9	30,1	143
	D	30,2	91,6	83	28,7	89,4	85
	E	14,3	42,1	19	13,5	33,3	18
	F	25,9	85,8	127	30,5	85,7	119
Haukantie	A	0,6	1,4	284	1,1	3,5	341
	B (suor.)	6,6	27,0	370	7,0	28,7	369
	B (käänt.)	13,6	48,3	29	12,0	37,0	27
	C	31,8	81,8	22	25,3	89,7	29
	D	25,5	72,9	48	23,9	76,3	59
	E	39,4	90,2	51	37,5	93,1	29

LIITE 4
Nykyisen valo-ohjauksen simulointitulokset

6.7.2004		13:30			14:15		
		viivytys sek./ajon.	pysähtyneet %	ajon.	viivytys sek./ajon.	pysähtyneet %	ajon.
Vanha Tuusulantie	A	4,8	18,5	406	5,3	20,3	492
	B	0,6	0,5	398	0,5	0,0	428
	C	33,5	84,8	66	34,0	80,3	71
	D	29,3	68,0	50	32,2	90,7	54
	E	36,3	75,0	4	48,5	100,0	2
Itäinen Ohikulkutie	A	12,6	50,2	324	12,8	45,1	389
	B	3,2	15,2	330	3,1	13,5	364
	C	8,7	24,4	135	9,6	23,6	157
	D	30,4	93,6	78	34,6	95,7	70
	E	13,5	52,4	21	23,6	62,5	16
	F	30,2	83,6	134	30,0	88,1	135
Haukantie	A	1,0	3,2	316	0,7	1,9	376
	B (suor.)	7,1	29,6	371	8,6	36,6	380
	B (käänt.)	12,8	36,8	19	9,8	26,7	15
	C	25,4	78,6	28	28,0	89,7	29
	D	23,3	70,7	41	23,0	66,1	56
	E	44,2	100,0	30	42,9	96,2	26

7.7.2004		9:00			10:00		
		viivytys sek./ajon.	pysähtyneet %	ajon.	viivytys sek./ajon.	pysähtyneet %	ajon.
Vanha Tuusulantie	A	3,6	14,1	398	4,6	18,4	484
	B	0,3	1,0	597	0,8	2,2	604
	C	22,8	68,4	98	23,4	76,9	108
	D	22,3	78,5	79	22,9	79,5	78
	E	58,3	100,0	3	37,1	100,0	7
Itäinen Ohikulkutie	A	11,8	45,1	344	11,3	50,1	400
	B	3,4	15,9	483	3,1	14,6	506
	C	7,7	22,1	136	9,1	26,8	164
	D	28,9	89,3	122	26,4	88,9	117
	E	17,1	62,5	16	21,1	65,4	26
	F	32,3	87,3	212	30,4	80,1	206
Haukantie	A	0,5	0,6	333	0,8	2,3	386
	B (suor.)	6,7	27,8	528	8,1	32,3	533
	B (käänt.)	13,4	42,4	33	14,6	55,2	29
	C	25,7	100,0	24	28,3	83,8	37
	D	28,2	82,5	80	29,5	82,4	91
	E	39,5	89,7	39	40,8	92,3	52

7.7.2004		11:00			12:00		
		viivytys sek./ajon.	pysähtyneet %	ajon.	viivytys sek./ajon.	pysähtyneet %	ajon.
Vanha Tuusulantie	A	4,8	19,9	477	0,7	2,2	582
	B	0,4	0,9	570	5,2	21,1	592
	C	26,9	69,9	103	29,2	81,7	120
	D	24,5	71,6	74	29,5	82,8	93
	E	55,5	100,0	4	39,5	87,5	8
Itäinen Ohikulkutie	A	16,4	54,5	407	10,5	41,8	501
	B	2,9	12,6	478	2,8	12,6	507
	C	11,4	24,5	143	8,6	21,7	184
	D	29,9	93,8	112	33,8	100,8	124
	E	16,0	59,6	47	16,8	72,0	25
	F	31,4	79,5	195	32,4	86,7	195
Haukantie	A	1,1	3,6	416	0,8	2,1	483
	B (suor.)	8,6	36,2	514	8,2	34,1	563
	B (käänt.)	12,4	44,4	36	12,0	38,1	21
	C	29,0	94,7	38	29,7	92,9	42
	D	27,4	74,7	79	24,7	69,3	75
	E	35,3	94,1	51	41,3	91,7	48

LIITE 4
Nykyisen valo-ohjauksen simulointitulokset

7.7.2004		13:00			14:00		
		viivytys sek./ajon.	pysähtyneet %	ajon.	viivytys sek./ajon.	pysähtyneet %	ajon.
Vanha Tuusulantie	A	5,3	19,5	420	4,8	16,3	787
	B	0,5	1,5	329	0,6	1,1	616
	C	37,9	85,1	74	34,9	80,8	104
	D	33,0	83,1	65	33,4	84,5	97
	E	43,2	100,0	5	60,8	100,0	11
Itäinen Ohikulkutie	A	10,1	35,9	328	14,1	51,3	620
	B	3,0	12,2	278	2,4	9,5	515
	C	9,2	22,7	154	9,0	21,4	262
	D	40,7	108,9	79	35,1	99,3	135
	E	29,5	100,0	11	17,6	64,7	34
	F	30,7	84,0	125	30,0	79,0	205
Haukantie	A	0,7	1,6	312	0,8	2,3	604
	B (suor.)	6,8	28,6	329	7,7	32,3	585
	B (käänt.)	10,1	26,7	15	13,8	40,0	35
	C	23,8	96,4	28	31,2	88,5	52
	D	29,3	82,1	28	26,6	76,5	68
	E	40,5	92,6	27	35,0	88,5	52

LIITE 5

Vanhan Tuusulantien liittymän vihreän ajoituksen määrittäminen

LIITTYMÄN NIMI JA NUMERO:

Vanha Tuusulantie (1)

OHJELMA:

Valo-ohjelma 2; päiväliikenne

LIIKENNETIEDOT

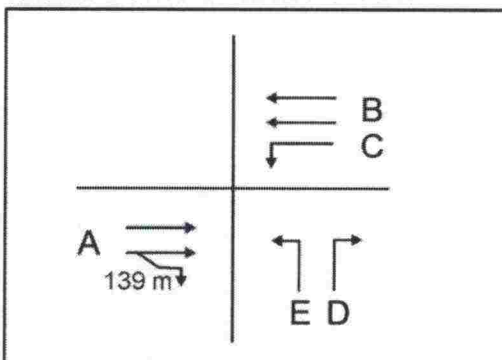
yksikkö: ajon/h laskentapvm: 24.3.2004

viikonpäivä: ke 7:00-8:00 (15 minuutin jakso)

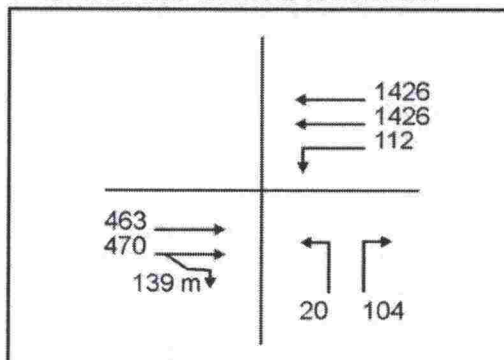
raskaan liikenteen osuus: 8 %

liikenteen kasvu:

KAISTAKAAVIO JA OPASTINRYHMÄT



KAISTAKAAVIO JA OPASTINRYHMÄT



VAIHE 1	VAIHE 2	VAIHE 3	VAIHE 4
g(väh) 45 s T= 6 s	g(väh) 4 s T= 7 s	g(väh) 4 s T= 7 s	

KIERTOAIKA C (s) = 60 sum(y) = 0,76 sum(T) = 13 sekuntia KUORMITUSASTE = 0,95

OPASTINRYHMÄ	vihreä vaiheessa no.	ominais- välityskyky s (ajon/h)	mitoitus- liikenne q (ajon/h)	suhteell. liik. määrä y = q/s	vihreän perusarvo g(p)=y*c	vihreän ajan osuus p=y/sum(y)	kasvuvara kerroin	VIHREÄ AIKA g (s)
A	→	1	1940	0,24	15	0,32		24
	→	1	1940	0,24	15	0,32		24
B	←	1	1940	0,74	44	0,99		42
	←	1	1940	0,74	44	0,99		42
C	↵	2	1900	0,06	4	0,8		11
D	↗	3	1900	0,06	4	0,8		7
E	↖	3	1900	0,02	1	0,2		5

LIITE 6

Uuden valo-ohjelman vaikutustarkastelun simulointitulokset

Uuden valo-ohjelman sujuvuustarkastelua varten tehtyjen simulointiajojen tulokset Taulukoissa oleva ajoneuvojen määrä (ajon.) on simulointiajon aikana malliin syötettyjen ajoneuvo-olioiden lukumäärä. Simulointiajoissa käytettiin samoja liikennetilanteita kuin nykytilanteen tarkastelussa, joten ajantasainen liikennetiedon mukainen liikennetilanne on toteutunut testialueella 6.7.2004 ja 7.7.2004.

6.7.2004		9:00			9:45		
		viivytys sek./ajon.	pysähtyneet %	ajon.	viivytys sek./ajon.	pysähtyneet %	ajon.
Vanha Tuusulantie	A	11,5	41,8	237	10,1	35,3	278
	B	1,0	4,2	358	0,6	1,8	342
	C	30,1	60,4	53	36,0	70,5	44
	D	33,1	78,4	37	34,9	84,0	50
	E	44,0	100,0	3	69,0	100,0	3
Itäinen Ohikulkutie	A	6,9	19,6	184	7,8	22,9	254
	B	3,0	13,5	304	2,9	12,5	280
	C	7,4	13,6	88	7,1	13,7	73
	D	29,1	95,3	85	34,2	98,7	76
	E	15,6	45,5	11	19,4	61,9	21
	F	28,1	85,0	120	30,6	82,1	106
Haukantie	A	0,6	1,7	177	0,5	1,2	252
	B (suor.)	6,3	27,2	349	7,8	35,2	307
	B (käänt.)	8,7	23,1	13	12,1	50,0	18
	C	20,9	88,9	18	27,1	87,0	23
	D	26,3	73,8	42	24,7	63,0	54
	E	37,8	96,8	31	42,2	96,0	25

6.7.2004		10:30			11:15		
		viivytys sek./ajon.	pysähtyneet %	ajon.	viivytys sek./ajon.	pysähtyneet %	ajon.
Vanha Tuusulantie	A	13,3	43,6	312	13,0	44,1	333
	B	0,3	0,9	345	0,1	0,0	362
	C	45,0	87,1	70	35,5	71,4	49
	D	32,8	78,3	46	32,5	74,6	59
	E	61,0	100,0	1	35,0	100,0	1
Itäinen Ohikulkutie	A	5,7	15,9	244	8,7	25,2	277
	B	3,2	13,8	325	2,7	10,5	313
	C	7,8	12,5	112	9,5	17,7	113
	D	26,1	91,8	73	26,7	97,5	80
	E	11,9	35,3	17	17,8	57,1	14
	F	29,3	79,8	109	25,4	81,9	116
Haukantie	A	0,5	2,1	242	0,6	1,9	265
	B (suor.)	8,1	33,6	351	8,8	34,7	352
	B (käänt.)	13,7	42,9	14	9,8	23,1	26
	C	48,3	94,4	18	24,4	100,0	27
	D	30,8	80,4	56	24,4	69,6	46
	E	48,7	96,4	28	43,2	94,6	37

6.7.2004		12:00			12:45		
		viivytys sek./ajon.	pysähtyneet %	ajon.	viivytys sek./ajon.	pysähtyneet %	ajon.
Vanha Tuusulantie	A	12,5	45,0	358	13,9	46,8	434
	B	0,6	1,3	392	0,9	4,1	391
	C	35,4	70,7	58	30,9	61,4	70
	D	29,9	70,7	41	24,5	62,3	61
	E	38,0	100,0	1	48,0	100,0	5
Itäinen Ohikulkutie	A	10,8	24,1	285	7,4	19,3	352
	B	3,5	14,3	335	3,4	15,2	342
	C	7,8	9,7	113	8,0	9,1	143
	D	40,4	104,8	83	29,2	95,3	85
	E	21,3	68,4	19	16,6	72,2	18
	F	32,2	87,4	127	27,0	76,5	119
Haukantie	A	0,7	2,1	282	0,5	0,6	341
	B (suor.)	8,2	35,7	370	8,3	33,1	369
	B (käänt.)	12,2	37,9	29	13,8	37,0	27
	C	23,4	86,4	22	31,8	89,7	29
	D	27,1	77,1	48	26,1	74,6	59
	E	40,3	88,2	51	36,7	93,1	29

6.7.2004		13:30			14:15		
		viivytys sek./ajon.	pysähtyneet %	ajon.	viivytys sek./ajon.	pysähtyneet %	ajon.
Vanha Tuusulantie	A	13,6	45,2	407	14,5	46,9	392
	B	1,3	4,5	398	0,6	0,9	428
	C	19,7	56,8	95	38,8	77,1	48
	D	29,5	70,0	50	32,3	72,5	40
	E	48,5	100,0	4	19,0	100,0	1
Itäinen Ohikulkutie	A	6,7	17,0	321	7,6	19,8	307
	B	3,1	14,5	330	2,6	11,5	364
	C	10,0	18,5	135	9,5	12,1	124
	D	29,5	96,2	78	31,9	94,3	70
	E	10,1	38,1	21	10,6	43,8	16
	F	29,4	82,8	134	28,7	81,5	135
Haukantie	A	0,5	1,6	316	0,6	2,0	301
	B (suor.)	6,2	24,7	369	6,4	25,6	379
	B (käänt.)	12,7	36,8	19	11,3	40,0	15
	C	18,4	84,6	26	26,2	87,0	23
	D	26,5	78,0	41	28,4	80,4	56
	E	41,5	100,0	30	36,9	96,2	26

LIITE 6

Uuden valo-ohjelman vaikutustarkastelun simulointitulokset

7.7.2004		9:00			10:00		
		viivytys sek./ajon.	pysähtyneet %	ajon.	viivytys sek./ajon.	pysähtyneet %	ajon.
Vanha Tuusulantie	A	9,5	31,7	243	11,8	41,5	484
	B	0,1	0,0	371	1,6	6,9	605
	C	34,8	60,0	65	31,3	58,3	108
	D	36,2	73,0	37	30,6	71,8	78
	E		0,0	0	41,0	100,0	7
Itäinen Ohikulkutie	A	7,8	26,6	192	6,7	20,4	400
	B	3,2	14,7	320	3,4	15,2	507
	C	7,2	19,0	84	7,7	15,2	164
	D	28,7	89,9	89	28,6	88,9	117
	E	22,1	80,0	10	12,8	46,2	26
	F	33,6	88,7	141	27,0	81,1	206
Haukantie	A	0,3	0,0	185	0,9	3,4	386
	B (suor.)	5,9	25,4	366	7,3	30,9	534
	B (käänt.)	13,7	45,5	22	10,1	31,0	29
	C	22,6	92,9	14	41,5	92,3	39
	D	29,5	80,8	52	29,2	80,4	92
	E	37,2	85,7	21	42,6	92,5	53

7.7.2004		11:00			12:00		
		viivytys sek./ajon.	pysähtyneet %	ajon.	viivytys sek./ajon.	pysähtyneet %	ajon.
Vanha Tuusulantie	A	10,2	33,2	512	12,7	42,1	591
	B	1,0	3,5	570	1,0	4,0	582
	C	34,2	64,1	103	34,1	69,2	120
	D	36,8	79,7	74	34,5	75,3	93
	E	47,4	100,0	5	47,0	87,5	8
Itäinen Ohikulkutie	A	7,2	22,1	437	6,7	20,2	499
	B	3,4	16,3	478	3,2	13,8	507
	C	7,5	14,6	151	7,9	10,3	184
	D	29,1	94,6	112	25,7	94,4	124
	E	16,1	53,2	47	15,7	56,0	25
	F	29,2	81,0	195	28,6	83,6	195
Haukantie	A	1,0	3,0	440	0,4	0,6	483
	B (suor.)	7,8	31,5	515	7,7	32,0	565
	B (käänt.)	11,2	33,3	36	10,2	33,3	21
	C	30,5	82,9	41	31,1	100,0	41
	D	22,9	69,6	79	28,9	89,3	75
	E	37,8	90,2	51	33,7	87,5	48

7.7.2004		13:00			14:00		
		viivytys sek./ajon.	pysähtyneet %	ajon.	viivytys sek./ajon.	pysähtyneet %	ajon.
Vanha Tuusulantie	A	12,5	42,4	417	14,2	46,2	788
	B	1,6	6,7	329	1,8	6,0	616
	C	35,9	68,9	74	34,9	65,4	104
	D	31,9	75,4	65	32,0	85,6	97
	E	51,2	100,0	5	48,1	100,0	11
						0,0	
Itäinen Ohikulkutie	A	8,1	24,0	328	7,8	18,8	622
	B	2,9	12,6	278	2,2	9,9	515
	C	9,3	22,1	154	10,2	19,8	262
	D	34,9	98,7	79	39,0	109,6	135
	E	22,8	54,5	11	17,4	55,9	34
	F	27,4	80,0	125	29,0	82,9	205
						0,0	
Haukantie	A	0,5	1,0	312	0,6	1,7	604
	B (suor.)	8,0	34,0	329	8,4	33,1	586
	B (käänt.)	11,7	26,7	15	12,1	37,1	35
	C	29,5	96,3	27	31,6	88,5	52
	D	27,8	71,4	28	24,8	77,9	68
	E	37,0	92,6	27	38,7	90,4	52



ISSN 951-803-371-4
951-803-371-4
ISBN 1459-1553 1459-
1553
TIEH 3200901-v 1
3200901-v